



Johannes Hämeri

Kuitubetonin käyttö ja mitoittaminen kiinnitetyissä pintabetonilattioissa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 03.04.2019

Valvoja: Professori Jouni Punkki

Ohjaaja: Johan Rosqvist

Tekijä Johannes Hämeri

Työn nimi Kuitubetonin käyttö ja mitoittaminen kiinnitetyissä pintabetonilattioissa

Maisteriohjelma Master's Programme in Building

Koodi ENG27

Technology

Työn valvoja Jouni Punkki

Työn ohjaaja(t) Johan Rosqvist

Päivämäärä 03.04.2019

Sivumäärä 88

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Kiinnitetyt pinalattiat ovat tyypillinen ratkaisu betonielementtirakenteisissa rakennuksissa. Tyypillisesti kiinnitettyjä pinalattioita esiintyy ontelolaattavälipohjissa. Kiinnitetyn pinalattian tarkoitus on aikaansaada tasainen ja laadukas lattiapinta. Kiinnitettyjen pinalattioiden haasteena on pintabetonin kutistumishalkeilu, sillä tuoretta betonia valetaan jo kovettuneen betonin päälle. Halkeilu syntyy pintabetonin ja alustan kutistumaeroista. Kutistuma jakautuu kovettumisvaiheen kutistumaan sekä betonin kuivumiskutistumaan, joka kasvaa ajan myötä loppu-arvoonsa. Halkeilua voidaan rajoittaa perinteisen raudoituksen lisäksi käyttämällä pinalattioissa kuitubetonia.

Diplomityön tavoitteena oli selvittää miten kuitubetonin halkeilun jälkeinen vetokapasiteetti eli jäännösvetolujuus vaikuttaa alustaan kiinni valettujen pinalattioiden halkeamaleveyksiin. Tutkimuksessa esiteltiin kuitubetoni materiaalina ja selvitettiin betonin kutistumaa aiheuttavia tekijöitä. Tämän lisäksi tutkittiin, betonin käyttäytymistä tilanteessa, jossa jo kovettuneen betonipinnan päälle valetaan tuoretta betonia. Jäännösvetolujuuden vaikutusta halkeamaleveyksiin tutkittiin eri kirjallisuuslähteistä löytyvien laskukaavojen avulla. Saatua tuloksia verrattiin lopuksi toisiinsa.

Tutkimuksessa selvisi, että pinalattian halkeilun hallintaan vaikuttaa kuitubetonin käytön lisäksi myös muut tekijät. Halkeilua ei useimmissa tapauksissa voida estää täysin, eikä kuitubetonilla voida vaikuttaa halkeaman syntyyn, sillä kuidut siirtävät vetojännityksiä vasta halkeilleessa poikkileikkauksessa. Pinalattian ja alustan välinen hyvä tartunta on kriittistä halkeilun rajoittamisen kannalta, sillä hyvä tartunta mahdollistaa halkeamien jakaantumisen tasaisesti pinalattian alueelle, jolloin syntyvät halkeamat ovat leveydeltään pienempiä. Tämän lisäksi betonin kutistumalla on merkittävä vaikutus halkeamaleveyksiin. Tuloksista nähdään, että jäännösvetolujuuden kasvaessa myös halkeamaleveydet pienenevät. Eri lähteistä otetut laskukaavat antavat keskenään melko johdonmukaisia tuloksia halkeamaleveyden arvoille. Kun pinalaatan paksuus kasvaa, syntyy yhden laskukaavan osalta suuruusluokaltaan merkittäviä eroja kahden muun menetelmän antamiin tuloksiin. Kokonaisuudessaan onnistunut ja vähän halkeillut pintabetonilattia vaatii kuitubetonin käytön lisäksi sopivan suhteituksen, jolla kutistumaa rajoitetaan suhteittamalla käytännön mahdollisuuksien rajoissa sekä hyvän tartunnan alustansa.

Avainsanat kuitubetoni, polymeerikuitubetoni, pinalattia, halkeilu



Author Johannes Hämeri

Title of thesis Usage and design of fibre reinforced concrete on bonded concrete slabs

Degree programme Master's Programme in Building
Technology

Code ENG27

Thesis supervisor Jouni Punkki

Thesis advisor(s) Johan Rosqvist

Date 03.04.2019

Number of pages 88

Language Finnish

Abstract

Bonded concrete overlay floors are a typical solution in concrete element buildings. Bonded concrete overlays are mainly used with hollow core slab floors to form a level and good quality floor surface. The problem with bonded concrete overlays is shrinkage cracking in the concrete overlay. Cracking of the overlay is caused by differences in shrinkage on the overlay and precast concrete. The main part of shrinkage is divided to autogenous shrinkage caused by the concrete hardening and to drying shrinkage which develops over time. Crack widths can be reduced with the use of FRC (Fibre Reinforced Concrete) which replaces the traditional rebar reinforcement.

The goal of this thesis was to examine how post crack tensile strength of FRC affects the crack widths of bonded concrete overlays. The study presents the material properties of FRC and investigates the properties that affects the shrinkage of concrete. The behavior of the bonded overlay and the precast concrete is also investigated in the study. The effect of post crack tensile strength on the crack widths of the overlay was examined by calculations based on forms found from different literature sources. The results were then compared against each other.

The study shows that many factors affects the cracking of bonded concrete overlays in addition to the use of FRC. On most cases the cracking cannot be fully prevented and the use of FRC does not affect the cracking phenomenon as fibers only transfer tensional loads when the crack has already formed. Good bond properties between the overlay and the precast concrete are essential and makes it possible for the cracks to form evenly to the concrete overlay thus reducing crack widths. The study also shows that the amount of shrinkage affects greatly to the crack widths. Results of calculations shows that the increase in post crack tensile strength reduces the crack widths. The calculations based on different sources provide consistent data but when overlay thickness increases one of the calculation methods starts to develop significantly different results to the other two methods. In conclusion a successful bonded concrete overlay with small crack widths requires good properties of concrete to reduce the shrinkage within practical limits and a good bond strength to the precast concrete.

Keywords FRC, SFRC, bonded, slab, cracking

Alkusanat

Diplomityön aihe tuli yhteistyönä usealta taholta. Työn tavoitteena oli tutkia kuitubetonipintalattioiden halkeilua. Työn aiheeseen päädyttiin, sillä kuitubetonin käyttö lattioissa on yleistä, mutta varsinaista mitoitusta tai tarkempaa ohjeistusta ei ole laadittu. Työhön osallistuneet ja työtä rahoittaneet henkilöt ja tahot olivat: Martti Matsinen – BLY, Jouko Ilvonen – Semtu, Janne Heikkilä – Bermanto, Johan Rosqvist sekä Tapio Aho – Ramboll. Haluan kiittää koko mukana ollutta ryhmää ja erityisesti Jouko Ilvosta aktiivisesta yhteydenpidosta ja avusta kirjallisuuslähteiden kanssa. Haluaisin lisäksi kiittää Äitiäni kannustavasta asenteesta ja avusta kiireisinä hetkinä sekä muuta tuttavapiiriäni töistä ja kotoa ketkä työn parissa kannustivat. Lopuksi haluan kiittää ohjaajaani Johan Rosqvistia.

Espoo 3.4.2019

Johannes Hämeri

Johannes Hämeri

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Merkinnät	7
Lyhenteet	9
Johdanto	10
1.1 Tausta	10
1.2 Tutkimuksen tavoitteet	11
1.3 Rajaukset	11
2 Kuitubetoni	12
2.1 Historia ja nykytilanne	12
2.2 Kuitubetoni materiaalina	12
2.3 Kuitujen ominaisuudet	13
2.3.1 Teräskuidut	13
2.3.2 Polymeerikuidut	16
2.4 Kuitubetonin jäännösvetolujuuden määrittäminen	19
2.4.1 Jäännöstaivutusvetolujuus	19
2.4.2 Jäännösvetolujuus	21
2.5 Kuitumateriaalin vaikutus jäännösvetolujuuteen	22
2.6 Kuitujen määrä betonissa	22
3 Kiinnitetyt pintabetonilattiat	23
3.1 Pintalattian paksuus	24
3.2 Pintalattian laatuvaatimukset	24
3.2.1 Pintalattian halkeilu	25
3.2.2 Pintalaatan tartunta alustaan	26
3.2.3 Ulkonäkö	26
3.3 Lattioiden kuormat	27
3.3.1 Kitkavoimat	27
4 Betonin kutistuminen ja kutistumishalkeilu	28
4.1 Betonin kutistumalajit	28
4.1.1 Plastinen kutistuma	29
4.1.2 Autogeeninen kutistuma	29
4.1.3 Kuivumiskutistuma	30
4.1.4 Lämpötilan vaihtelun aiheuttamat muodonmuutokset	32
4.2 Kuivumiskutistumaan vaikuttavat tekijät	32
4.2.1 Ulkoiset tekijät	33
4.2.2 Sisäiset tekijät	34
4.3 Kutistumishalkeilun hallinta ja betonin ominaisuudet	35
4.3.1 Betonin vetolujuuden kehittyminen	36
4.3.2 Betonin viruma	37
4.3.3 Betonin kutistumaa vähentävät lisäaineet (SRA)	39
4.4 Kutistumiseen vaikuttavat tekijät pintabetonilattioissa	39
4.4.1 Ontelolaattavälipohjan vaikutus pintabetonilattiaan	40
4.4.2 Kantavan rakenteen päälle valaminen	40
4.4.3 Pintalattian pinnan ja pohjan kutistumaero	41

4.5	Kutistuman suuruuden laskennallinen arviointi.....	41
4.5.1	Kutistuman laskenta Eurokoodin mukaan.....	41
4.5.2	Kutistuman laskenta SRMK	43
5	Matemaattinen malli kutistumishalkeilulle	45
5.1	Halkeamaleveys ja halkeamaväli kirjallisuudessa	45
5.1.1	Jürgen Mandl:n laskentamenetelmä.....	46
5.1.2	BY 66, Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje.....	47
5.1.3	Industrigolv, Betongrapport nr13, 2008.....	49
5.2	Oma matemaattinen malli halkeilulle	49
5.3	Laskentakaavojen vertailu	51
6	Laskelmien tulokset ja mitoitusohje	52
6.1	Jürgen Mandl:n laskentamenetelmä	52
6.1.1	Halkeamaväli	52
6.1.2	Halkeamaleveys	54
6.2	BY 66, Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje.....	57
6.3	Industrigolv, Betongrapport nr13, 2008	61
6.4	Tulosten vertailu	63
6.5	Tulosten yhteenveto	65
6.6	Laskentakaavat ja kuitubetonilattian mitoitus	66
7	Johtopäätökset	68
	Lähdeluettelo.....	70
	Liiteluettelo.....	72
	Liite 1. Halkeamaleveydet Mandl:n kaavalla	73
	Liite 2. Halkeamaleveydet Industrigolv Betongrapport nr13, 2008 laskukaavalla.....	82
	Liite 3. Halkeamavälit Mandl:n kaavalla.....	85
	Liite 4. Oman laskukaavan johtaminen	87
	Lähdeluettelo	
	Liitteet	

Merkinnät

A_c	[mm ²]	betonin poikkileikkausala
E_c	[kN/m ²]	normaalibetonin tangenttimoduuli
E_{cm}	[kN/m ²]	betonin sekanttimoduuli
$R_{10,20}$	[%]	kuitubetonin jäännöslujuuskerroin
R_{ax}		betonikappaleen aksiaalisen liikerajoituksen aste
RH	[%]	ympäristön suhteellinen kosteus
RH_0	[%]	100% suhteellinen kosteus
b	[mm]	poikkileikkauksen leveys
d_f	[mm]	kuidun halkaisija
f_{cm}	[kN/m ²]	keskimääräinen puristuslujuus
f_{cm0}	[kN/m ²]	= 10MPa – selvitä tarkemmin
f_{ct}	[kN/m ²]	betonin vetolujuus
f_{ctd}^f	[kN/m ²]	kuitubetonin jäännösvetolujuus
$f_{ftd,R1}$	[kN/m ²]	kuitubetonin R1 luokan jäännösvetolujuuden mitoitusarvo
f_{ctm}	[kN/m ²]	betonin nimellisvetolujuus
$f_{ftd,R1}$	[kN/m ²]	kuitubetonin jäännösvetolujuus
$f_{ft,R1}$	[kN/m ²]	kuitubetonin jäännöstaivutusvetolujuus
f_{fu}	[kN/m ²]	kuidun vetolujuus
f_r	[kN]	alustan lepokitkavoima
h	[mm]	poikkileikkauksen korkeus
h_0	[mm]	poikkileikkauksen muunnettu paksuus
k_h		kerroin, joka riippuu muunnetusta paksuudesta
k_{sh}		rakenteen muunnetusta paksuudesta riippuva kerroin
k_{sn}		SRMK B4 taulukon 2.4 mukainen kerroin
k_{sh}		SRMK B4 taulukon 2.5 mukainen kerroin
l_c	[mm]	kuidun kriittinen pituus
n		halkeamaleveyden ja pintavalun korkeuden suhde
s		sementin tyypistä riippuva kerroin
$S_{r,max}$	[mm]	halkeamaväli
t	[d]	aika vuorokausina
t_0	[d]	betonin ikä kuormittamishetkellä vuorokausina
t_s	[d]	betonin ikä kuivumiskutistumisen alkamishetkellä
u	[mm]	kuivumiselle alttiin poikkileikkauksen osan piiri
w	[mm]	halkeamaleveys
w_c	[mm]	halkeamaleveys
w_{max}	[mm]	halkeamaleveys
α		1 kun $t < 28$ – selvitys tarkemmin
α_{ds1}		kerroin, joka riippuu sementin tyypistä
α_{ds2}		kerroin, joka riippuu sementin tyypistä
β_{as}		betonin sisäisen kutistuman ajasta riippuva kerroin
β_{cc}		ajasta ja betonin tyypistä riippuva kerroin
β_{ds}		betonin muunnetusta paksuudesta riippuva kerroin
β_{RH}		ympäristön suhteellisesta kosteudesta riippuva kerroin
ϵ_{ca}	[mm/m]	sisäinen kutistuma
ϵ_{cc}	[mm/m]	virumasta aiheutunut muodonmuutos
ϵ_{cd}	[mm/m]	kuivumiskutistuma

$\epsilon_{cd,0}$	[mm/m]	kuvumiskutistuman perusyhtälön kerroin
ϵ_{cs}	[mm/m]	kokonaiskutistuma
ϵ_{cs0}	[mm/m]	betonin loppukutistuman perusarvo
ϵ_T	[mm/m]	lämpötilamuodonmuutos
γ_f		betonin osavarmuuskerroin
η_f		kerroin, jonka avulla huomioidaan kuidun suuntautuminen
$\sigma_c(t_0)$	[kN/m ²]	betonin jännitys ajanhetkellä t
$\phi(t, t_0)$		virumaluku aikavälille t-t ₀
ϕ_{ef}		betonin virumisaste
τ	[kN/m ²]	keskimääräinen tartuntajännitys

Lyhenteet

FRC
SRMK

Fibre Reinforced Concrete (Kuitubetoni)
Suomen rakentamismääräyskokoelma

Johdanto

1.1 Tausta

Kuitubetonin käyttö ja tutkimus on lisääntynyt. Suomessa kuitubetonissa käytetään pääasiassa teräskuituja, synteettisiä makrokuituja sekä synteettisiä mikrokuituja. Kuitubetonin kaupallinen käyttö valmisbetonissa alkoi teräskuitujen osalta noin vuonna 1988. 2000-luvulla kuitubetonin käyttö laajeni myös synteettisillä makrokuiduilla vahvistettuihin valmisbetoneihin. Synteettisten kuitujen käytön mahdollisti niiden vetolujuuden kehittäminen tasolle 600-800 MPa. Synteettisiä mikrokuituja on käytetty plastisen halkeilun rajoittamiseen 1990-luvulta asti ja niitä käytetään samoin myös nykyään.

Merkittävin kuitubetonin käyttökohde on lattiabetoni ja ruiskubetoni, mutta kuitubetonia käytetään jonkin verran myös betonielementeissä. Teräskuiduilla vahvistettua kuitubetonia käytetään pääosin maanvaraisissa lattioissa. Synteettisillä kuiduilla vahvistetun betonin käyttö on rajoittunut pääasiassa pinalattioiden halkeilun hallintaan. Pelkästään synteettisillä kuiduilla vahvistetun betonin rakenteellista käyttöä kantavissa rakenteissa ei nykyisellään normeissa sallita. Synteettisiä kuituja käytetään betoniteollisuudessa myös muun muassa sandwich-elementtien ei-kantavissa ulkokuorissa, betonisissa pihalaatoissa ja muissa vastaavissa sovelluksissa. Teräskuitujen käyttöä kantavissa rakenteissa ollaan aloittamassa uusien ohjeistusten ja tutkimustulosten myötä.

Synteettisiin kuituihin lukeutuvia polymeerikuituja käytetään pintabetonilattioissa perinteisen raudoituksen korvaajana kutistumishalkeilun rajoittamiseksi. Polymeerikuitujen käyttö pinalattioissa on vähäistä ja tutkimustuloksia polymeerikuidulla vahvistetuista pinalattioista on vähän. Synteettisiin kuituihin kuuluvien polymeerikuitujen käytölle pinalattioissa ei toistaiseksi ole virallista mitoitusohjetta. Kuitujen annosmäärät betonissa perustuvat valmistajien suosituksiin ja lopputulokset pinalattian laadussa ovat vaihtelevia.

Perinteiseen verkkoraudoitukseen verrattuna kuitubetonin käytöllä voidaan saavuttaa aika-tilausäästöjä. Kuitubetoni ei tarjoa merkittäviä kustannussäästöjä verkkoraudoitukseen verrattessa. Kuitubetonilla vältetään verkkoraudoituksen asennustyövaihe. Asennustyöhön käytetyn ajan lisäksi verkkoraudoituksen epäedullisiin ominaisuuksiin lukeutuu verkkoraudoituksen mahdollinen asettuminen pinalattian pohjalle, jolloin verkkoraudoitus ei välttämättä toimi pinalattiassa aiotulla tavalla. Kuitubetonin käytön haasteena on kuitubetonin homogeenisuus. Kuidut voivat palloutua ja pakkautua betonissa, jolloin vetorasituksia siirtäviä kuituja ei ole tasaisesti betonimassassa.

Polymeerikuitujen käytöllä pyritään tarjoamaan vaihtoehto teräskuiduille. Teräskuitujen haasteisiin pinalattioissa lukeutuu kuitujen nouseminen lattian pintaan. Lattian pinnasta esiin työntyvät kuidut joudutaan poistamaan mekaanisesti. Myös synteettiset kuidut nousevat lattian pintaan, mutta niiden poistaminen on teräskuituja helpompaa, sillä esiin nousevat polymeerikuidut voidaan poistaa esimerkiksi polttamalla. Lähellä betonin pintaa sijaitsevat teräskuidut ovat myös alttiita ruostumiselle. Myös teräskuitubetonin pumpattavuus voi aiheuttaa haasteita jäykkien kuitujen takia. Polymeerikuidut eivät ole alttiita ruostumiselle. Polymeerikuiduilla betonin pumpattavuuteen voidaan saada parannuksia verrattuna teräskuitubetoniin.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Diplomityön tavoitteena on selvittää pintabetonilattian betonin kutistumaan vaikuttavat tekijät sekä tutkia estetyn kutistuman aiheuttaman halkeilun hallintaa yksinomaan kuiduilla vahvistetussa pinalattiassa. Tutkimuksessa keskitytään ensisijaisesti teräs- sekä polymeerimakrokuituihin ja niiden toimintaan halkeilun hallinnassa. Tutkimuksessa esitellään myös polymeerimikrokuidut, sillä mikrokuitujen käytöllä plastista kutistumaa voidaan vähentää ja täten parantaa pintalaatan ominaisuuksia ja rajoittaa ulkonäöllisesti haitallista halkeilua. Tuloksina pyritään esittämään kuitubetonin jäännösvetolujuuden ja halkeamaleveyden sekä halkeilun jakautumisen välisenä yhteytenä. Tutkimuksella pyritään selkeyttämään polymeerikuitujen käyttöä pinalaatoissa ja luomaan pohjaa polymeerikuitubetonin mitoitukselle. Tutkimuksella pyritään myös luomaan pohjaa jatkotutkimuksille esimerkiksi kokeellisen tutkimusaineiston tueksi.

1.3 Rajaukset

Diplomityössä keskitytään ainoastaan kiinnitettyihin pinalaattoihin, joissa verkkorautoitus on korvattu kuiduilla. Kiinnitetyssä pinalattiassa pintavalun ja alustan rajapinnan kitka rajoittaa kutistumista. Estetty kutistuma aiheuttaa pinalaattaan vetojännityksen, jonka ylitäessä betonin vetolujuuden halkeamia syntyy. Kuitumateriaalit rajataan teräs- sekä polymeerikuituihin. Polymeerikuidut rajataan makrokuituihin, joita käytetään halkeilun hallintaan. Polymeerimikrokuitujen vaikutus betonin kutistumassa otetaan esille, mutta mikrokuidut eivät toimi rakenteellisena vahvistuksena.

2 Kuitubetoni

2.1 Historia ja nykytilanne

Kuituja on historiallisesti käytetty hauraiden materiaalien vetolujuuden lisäämiseksi. Vanhimpia kuitumateriaaleja ovat olleet luonnonkuidut, kuten puu, oljet sekä eläinten karvat. Asbestikuituihin siirryttiin 1800-luvun lopulla ja niiden käyttö betonissa jatkui 1970-luvulle asti. Polymeerikuitujen kehityksen taustalla oli tarve saada terveydelle vaaralliselle asbestille korvaaja.(1, 2)

Nykyaikana kuitujen käyttö insinöörimateriaaleissa on yleistä niiden tarjoaman komposiitivaiikutuksen takia. Erilaisia kuituja käytetään esimerkiksi muoveissa, keramiikassa, sementissä ja kipsissä parantamaan materiaaliominaisuuksia. (1) Rakennusosalalla rakenteellisessa käytössä teräskuidut ovat yleisimmin käytettyjä kuituja. (1) Synteettisiä kuituja käytetään pääasiassa plastisen kutistumishalkeilun hallintaan laatoissa, sekä teräskuitujen tapaan parantamaan kovettuneen betonin jäännösvetolujuutta. (2)

2.2 Kuitubetoni materiaalina

Betonilla on matala vetolujuus ja murtovenymä. Tavanomainen tapa kasvattaa betonirakenteen vetojännitysten kestoa on rakenteen raudoittaminen perinteisillä harjateräksillä tai esijännitetyillä teräsjänteillä. Raudoite voidaan suunnitella jatkuvaksi ja se voidaan sijoittaa poikkileikkaukseen rakenteellisen toiminnan kannalta optimaalisesti. (1)

Kuitubetoni on komposiittimateriaali, joka koostuu betonista sekä siihen sekoitetuista kuituista. Kuidut ovat raudoitteena epäjatkuvia sekä satunnaisesti betonimassaan hajautuneita. Betoniin sekoitettavien kuitujen muoto, koko ja materiaali voivat vaihdella. Kuitumateriaaleja ovat esimerkiksi teräs, polymeerit, lasi sekä hiilikuitu. (1)

Kuitubetonin tarkoituksena on halkeilun jälkeisen vetolujuuden eli jäännösvetolujuuden lisääminen, mikä johtaa materiaalin sitkeämpään toimintaan. Vetolujuuden kasvu perustuu kuitujen kykyyn siirtää vetojännityksiä halkeaman yli. Halkeilun jälkeinen jäännösvetolujuus auttaa tavanomaisesti pienentämään halkeamanleveyksiä. Muita kuitubetonin etuja on muun muassa plastisen kutistumishalkeilun rajoittaminen, palonkestävyyden paraneminen, sekä iskun- ja kulutuskestävyyden paraneminen. (1)

2.3 Kuitujen ominaisuudet

Käytettävien kuitujen ominaisuudet vaikuttavat kuitubetonin ominaisuuksiin. Näitä tekijöitä ovat:

- kuitutyyppi
- kuitumateriaali
- geometria
- hoikkuusluku
- tilavuusprosentti
- asento betonimatriisissa
- jakaantuminen betonimatriisissa

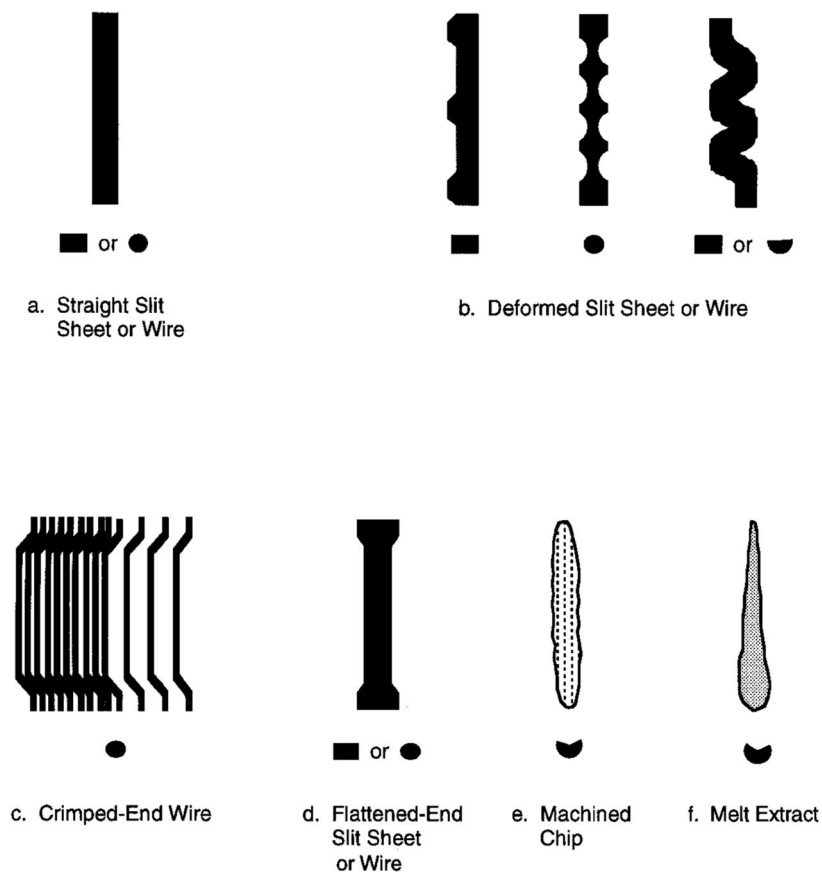
Betonissa yleisesti käytettyjä kuitumateriaaleja ovat teräs, lasi, synteettiset materiaalit kuten polymeerit sekä erilaiset orgaaniset kuitumateriaalit. Suomessa yleisimmin käytettyjä kuituja ovat teräskuidut sekä erilaiset polymeerikuidut. Tutkimus rajataan käsittelemään teräs- ja polymeerikuituja.

2.3.1 Teräskuidut

Teräskuidut ovat yleisimmin käytetty kuitutyyppi. Teräskuitujen käyttöä betonissa on tutkittu 1950-luvulta lähtien. American Concrete Institute (ACI) – komitean 544 raportissa (1) on mainittu kuitubetonin ominaisuuksiin vaikuttavia kuitujen ominaisuuksia. Näitä ovat muun muassa annostelumäärä, kimmomoduuli sekä kuitujen lujuusominaisuudet. (1)

Teräskuidut valmistetaan korkealaatuisesta teräksestä ja kuitutyyppejä on useita. Kuidut ovat joko suoria tai muotoiltuja teräslangasta katkottuja tai teräslevystä leikattuja kuituja. Yksinkertaisin kuitutyyppi on suora kuitu, mutta myös muotoiltuja kuituja on saatavilla. Erilaisilla muotoiluilla pyritään parantamaan kuitujen tartuntaominaisuuksia. Kuidut voivat olla aaltomaisia tai pinnaltaan epätasaisia. Kuidut voivat olla myös suoria, mutta päistään muotoiltuja esimerkiksi koukkupäisiä tai litistettyjä. Muotoilun tavoitteena on edesauttaa mekaanista ankkuroitumista betoniin. Muotoilu vaikuttaa myös kuitujen leviämiseen tuoreessa betonimassassa. (3, 4)

Markkinoiden yleisin teräskuitu on vedetty lankakuitu, jonka vetolujuutta kasvatetaan erityisellä vetoprosessilla. Tässä prosessissa kuidun halkaisija pienenee 4-5 millimetristä noin yhteen millimetriin ja myötölujuus kasvaa 90-95 prosenttiin murtolujuudesta, joka on yli 1100MPa. Tästä syystä kuidun päihin tehdään tartuntakoukut, jotka suoristuvat kuidun vetojännityksen lähestyessä murtovetolujuutta ja joiden ansiosta saavutetaan teräskuitubetonille ominainen murtositkeys. Kuvassa 2.1 on esitetty erilaisia teräskuitutyyppejä.



Kuva 2.1 Erilaisia kuitutyyppejä. a. Suora, litteä tai pyöreä. b. Muotoiltu litteä tai pyöreä. c. Koukkupäinen pyöreä. d. Päistään levitetty litteä tai pyöreä. e. Höylätty lastu. f. Sulattamalla eroteltu. (1)

Betoniin käytettäville teräskuiduille on Euroopassa tuotestandardi SFS-EN 14889-1, joka käsittelee teräskuitujen rakenteellista ja ei-rakenteellista käyttöä betonissa. Standardi määrittelee rakenteelliseksi käytöksi käytön, jonka tarkoituksena on vaikuttaa betonin rakenteelliseen kestävyyskykyyn. Teräskuiduilla tulee olla CE-merkintä. (5) Standardi jaottelee kuidut seuraaviin luokkiin:

- Ryhmä I: kylmävedetty teräslanka (cold-drawn wire)
- Ryhmä II: levystä leikattu kaistale (cut sheet)
- Ryhmä III: sulattamalla tuotettu (melt extracted)
- Ryhmä IV: höylätty kylmävedetty teräslanka (shaved cold-drawn wire)
- Ryhmä V: Paloista koneistettu (milled from blocks)

Standardissa on määritelty, että CE-merkinnässä on oltava kuidun tunnistenumero, nimi, valmistajan tiedot sekä muita tunnistetietoja. (5)

2.3.1.1 Teräskuitujen mitat

Standardin (5) mukaan ryhmien I ja II kuiduille tulee esittää pituus (l_f), ekvivalentti halkaisija (d_f) sekä näiden suhdetta kuvaava hoikkuusluku (l_f/d_f). (5) Näiden lisäksi tärkeitä ominaisuuksia ovat lujuus, jäykkyys sekä hyvät tartuntaominaisuudet betonin kanssa. Hoikkuusluku vaikuttaa kuidun tartuntaominaisuuksiin, sillä hoikalla kuidulla on tilavuuteensa nähden suuri tartuntapinta-ala.

Hoikkuusluvun arvo vaihtelee lähteestä riippuen välillä 20-100 tai 15-85. (1, 4) Hoikkuusluvun ollessa alle 55, kuidut sekoittuvat tuoreeseen betonimassaan tasaisesti, eikä kuidut lukitu toisiinsa muodostaen paakkuja. Mikäli hoikkuusluku on suurempi, tulee kuidut liimata kampoihin. Teräskuitujen halkaisija on pyöreillä teräskuiduilla 0,25-1,00 mm. Suorakaiteen muotoisilla kuiduilla paksuus on 0,15-0,64 mm ja leveys 0,25-2,03 mm. Edellä mainitut arvot vaihtelevat hieman lähteestä riippuen. (1, 4).

Teräskuitujen pituudet vaihtelevat 6,4-85 mm välillä. Tavanomaisesti kuidut ovat kuitenkin n. 50-60 mm pituisia. Kuidun teoreettinen kapasiteetti kasvaa kuidun pituuden kasvaessa, mutta huonomman leviämiskykynsä takia käytännön kapasiteetti jää pienemmäksi. Kuitubetonin sitkeä toiminta perustuu kuidun liukumiseen ulos betonimatriisista. Kuidun kriittinen pituus (l_c) on vähimmäispituus, jolla kuidun täyden kapasiteetin vaatima tartunta saavutetaan. Suoran kuidun kriittinen kuitupituus voidaan laskea kaavalla 1 (6)

$$l_c = \frac{f_{fu} * d_f}{2 * \tau} \quad (1)$$

Missä:

f_{fu} kuidun vetolujuus
 d_f kuidun halkaisija
 τ keskimääräinen tartuntajännitys

Kuidun keskimääräinen tartuntapituus (l_c) on todennäköisyysjakauman perusteella $\frac{1}{4} * l_f$. Murtotilanteessa kuitu liikuu ulos betonimatriisista eikä katkea, mikäli kuidun pituus on pienempi kuin kriittinen pituus. Tartunta pettää halkeamarajapintaan siitä kuidun osasta, jolla on vähemmän tartuntapituutta. Mikäli kuidun pituus on suurempi kuin kriittinen pituus, tapahtuu murtuma hauraasti kuitujen katketessa. (6)

2.3.1.2 Teräskuitujen lujuusominaisuudet

Teräskuidut valmistetaan korkealaatuisesta teräksestä. Tyypillisesti materiaaleina on hiili-teräs tai ruostumaton teräs. Lähteestä riippuen vetolujuuden vaihteluväliksi on annettu noin 345-2600 MPa.(6) Amerikkalaisessa ASTM-standardissa vetolujuuden vähimmäisarvoksi on määritetty 345 MPa ja japanilaisessa JSCE-standardissa vähimmäisarvo on 552 MPa.(1) Lähteessä (4) teräskuitujen myötölujuuden vaihteluväliksi on annettu 500-1700 MPa, mutta tavanomaisesti Suomessa käytettävien kuitujen vetolujuus on 1100-1300 MPa. Teräskuitujen materiaaleina on tyypillisesti hiili-teräs tai ruostumaton teräs ja niiden kimmomoduuli on noin 210 GPa, joka vastaa tavanomaisten raudoitusterästen kimmomoduulia. (6)

2.3.1.3 Tuore teräskuitubetoni

Teräskuidut eivät vaikuta tuoreessa betonissa tapahtuviin kemiallisiin reaktioihin, joten teräskuitu toimii betonimassassa runkoaineen tavoin. Pienillä kuitumäärillä ei välttämättä lattiabetoneiden suhteitukseen tarvita suuria muutoksia, mutta yleisesti ottaen kuitujen lisääminen tulee huomioida suhteituksessa. Kuitubetonin ominaisuuksiin vaikuttaa kuitujen lisäksi kiviaineksen rakeisuuskäyrä sekä viskositeetti, joita muokkaamalla voidaan vaikuttaa esimerkiksi kuitubetonin pumpattavuuteen. (6)

Kuitujen käyttö asettaa haasteita betonin maksimiraekoolle, sillä suuri raekoko voi johtaa kuitujen kasaantumiseen. Teräskuituja käytettäessä suositeltava maksimiraekoko on 16 mm. Suurempaa maksimiraekokoa käytettäessä suhteituksen on oltava tarkempi. Kuitujen limittymisen kannalta kiviaineksen raekoko ei saa ylittää kolmasosaa kuitujen pituudesta. Kiviaineksen maksimiraekoon lisäksi myös kiviaineksen määrä vaikuttaa kuitujen annosteluun. Mitä pienempi maksimiraekoko ja kiviaineksen määrä, sitä enemmän kuituja voidaan annostella betonimassaan ilman riskiä kuitujen paakkuuntumisesta palloiksi betonimassaan. (6)

Kuidut sekoitetaan betonimassaan nykyään käytännössä automatisoidusti. Kuitusyötin punnitsee ja syöttää halutun määrän kuituja betonimassaan. Annostelutarkkuus on noin ± 2 kg/m³. Kuitubetonin sekoitus aika on noin kaksinkertainen tavalliseen betoniin nähden, jotta kuitujen tasainen leviäminen varmistetaan. Sekoitus tulisi tehdä mieluiten sekoitin- asemalla tasaisen laadun varmistamiseksi. (6)

2.3.2 Polymeerikuidut

Polymeerikuiduilla on Euroopassa harmonisoitu tuotestandardi SFS-EN 14889-2, joka koskee kuitujen rakenteellista ja ei-rakenteellista käyttöä. Standardi määrittelee polymeereihin kuuluvaksi kaikki polymeeriset materiaalit kuten polypropyleenin, polyolefiinin, polyetyleenin, polyesterin, nailonin, polyvinyylialkoholin, polyakryylin sekä aramidit. (7)

Polymeerikuidut jaotellaan standardissa kahteen luokkaan. Luokka I jaotellaan standardissa luokkiin Ia, joka sisältää alle 0,30 mm halkaisijaltaan olevat monofilamenttimikrokuidut sekä Ib, joka sisältää alle 0,30 mm halkaisijaltaan olevat fibrilloidut mikrokuidut. Luokka II käsittää yli 0,30mm paksuiset makrokuidut. (7)

Polymeerikuitujen käyttötarkoitus riippuu kuituluokasta. Luokkaan I kuuluvia mikrokuituja käytetään tuoreen betonin ominaisuuksien parantamiseen, sekä kovettuneen betonin lohkeilun hallintaan palotilanteissa. Luokkaan II kuuluvia makrokuituja puolestaan käytetään kovettuneen betonin jäännösvetolujuuden parantamiseen teräskuitujen tapaan. (2)

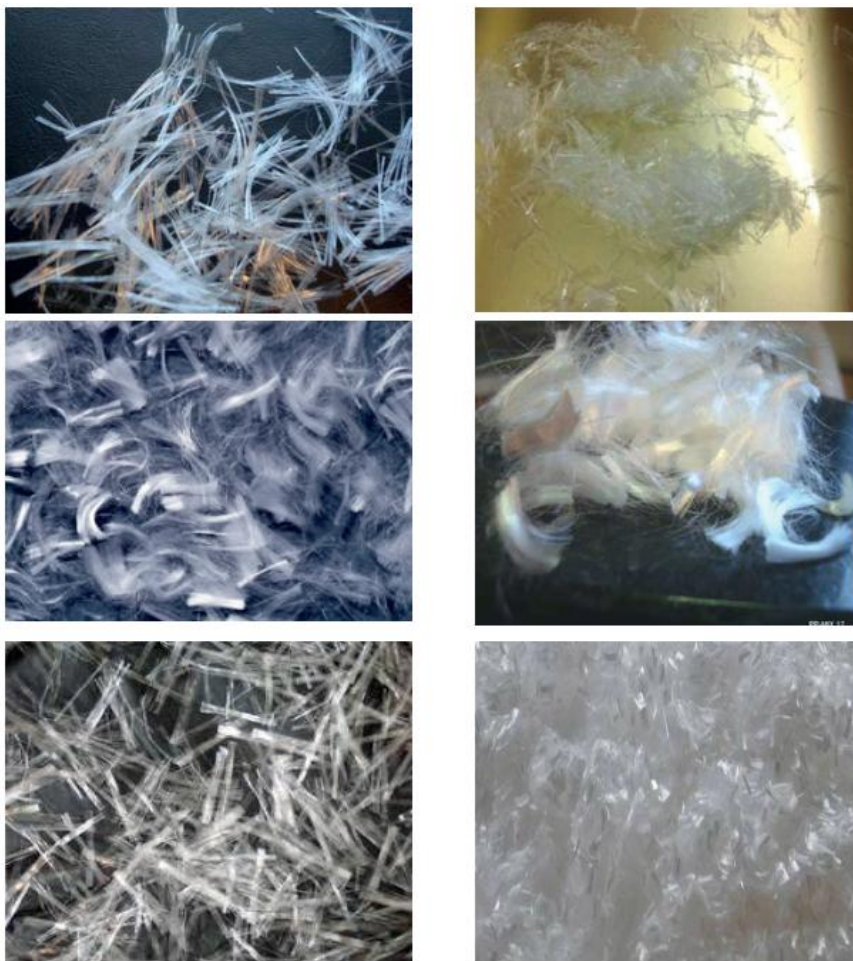
2.3.2.1 Mikrokuidut

Mikrokuidut ovat noin 5-30 mm pitkiä ja paksuudeltaan muutama kymmenen mikrometriä. Yleensä mikrokuidut ovat polypropeenaa, mutta materiaaleihin lukeutuu myös lasi, akryyli, polyesteri ja nailon. Mikrokuidut jaotellaan yksisäikeisiin (monofilamentti) ja monisäikei-

siin (multifilamentti) kuituihin sekä fibrilloituihin kuituihin ja ne valmistetaan vetämällä materiaalia kuumana. Monofilamenttikuidut muodostuvat yksittäisistä kuduista ja multifilamenttikuidut useamman kuidun nipuista. Fibrilloidut kuidut ovat monofilamenttikuituja paksumpia ja niiden valmistustapa on ohuesta kalvosta leikkaaminen sekä sitä seuraava fibrilloiminen, jossa kuidut jauhaantuvat ja seinät kuituuntuvat, jolloin pinta ala kasvaa ja kuidun tartuntaominaisuudet paranevat. (2)

Mikrokuitujen fyysiset ominaisuudet vastaavat tuoreen betonin ominaisuuksia ja niiden pääasiallinen käyttötarkoitus on tuoreen betonimassan ominaisuuksiin vaikuttaminen. Mikrokuiduilla voidaan parantaa betonimassan koossapysyvyyttä, vähentää vedenerottumista sekä pienentää plastista painaumaa ja vähentää plastista kutistumishalkeilua. Mikrokuidut voivat parantaa kovettuneen betonin kulutus- ja iskunkestävyyttä, sekä ehkäistä lohkeilua palotilanteissa. (2)

Lattiabetoneissa mikrokuituja käytetään vähentämään plastista kutistumishalkeilua. Kuidut silloittavat plastisen kutistuman aiheuttamia mikrohalkeamia ja estävät näin ollen plastisten halkeamien leviämistä. Mikrokuidut parantavat myös betonimassan koossapysyvyyttä sekä vähentävät veden erottumista, sekä plastista painumaa. Kuvassa 2.2 on erilaisia mikrokuituja (2)

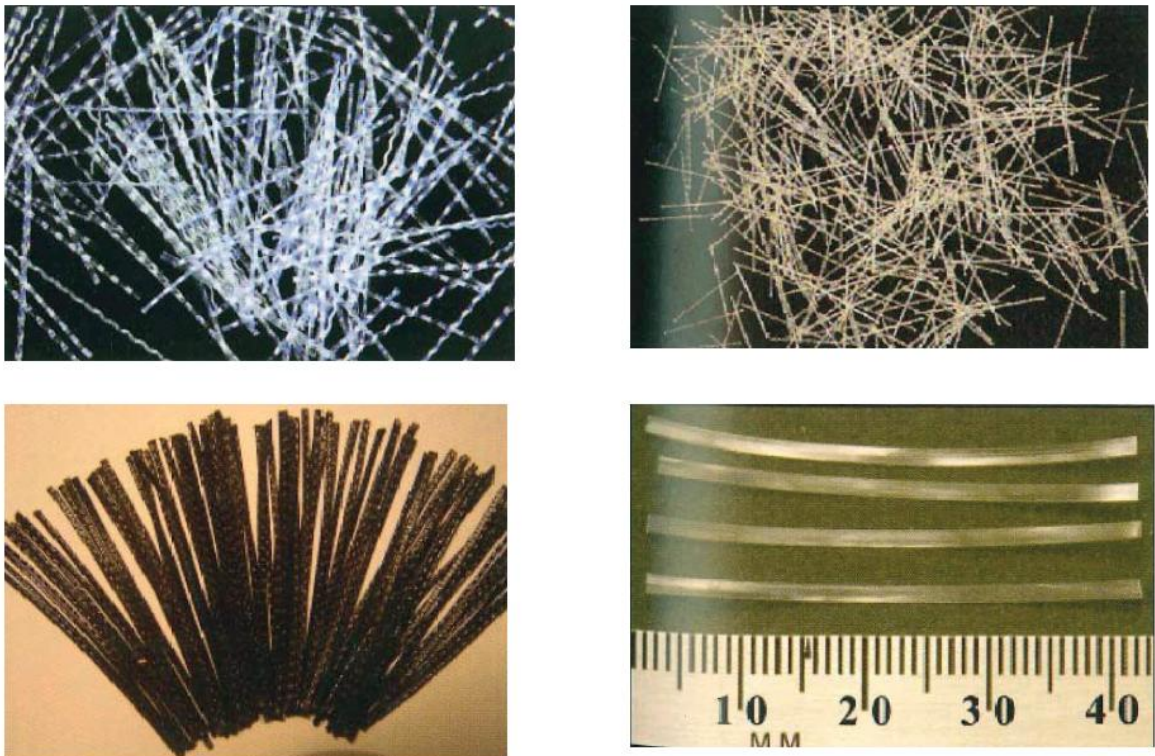


Kuva 2.2 erilaisia mikrokuituja. Ylärivillä monofilamenttikuituja, keskirivillä multifilamenttikuituja ja alarivillä fibrilloituja kuituja. (2)

2.3.2.2 Makrokuidut

Makrokuidut ovat standardin SFS-EN 14889-2 mukaan yleensä rakenteelliseen käyttöön tarkoitettuja polymeerikuituja (7). Standardin määritelmä rakenteellisesta käytöstä on betonin kuormankantokyvyn lisääminen, mutta niitä ei käytetä kantavissa rakenteissa. Makrokuidut toimivat kuitubetonissa teräskuitujen tavoin antaen haljenneelle betonille jäänösvetolujuuden. Makrokuituja käytetään tyypillisesti pintalattioissa, maanvaraisissa lattioissa, erilaisissa pihakivissä, betonituotteissa, laatoissa sekä sandwich elementtien ulkokuorissa. (2)

Polymeerisen makrokuidun tyypillinen vetolujuus on 350-700 MPa ja kimmokerroin 3000-10 GPa. Polymeerikuidun tiheys on noin 900 kg/m^3 ja tyypillinen hoikkuusluku on välillä 70-110, paksuuden ollessa 0,5-1 mm ja pituuden ollessa 40-60 mm. Polymeerikuitujen toiminta betonissa perustuu suureen kappalemäärään ja hyvään tartuntaan. Ne ovat muodoltaan optimoituja tartuntapinta-alan maksimoimiseksi. Kuidut voivat olla muodoltaan pyöreitä tai litteitä ja usein pituussuunnassa aallotettuja, mutta myös suoria kuituja on olemassa. Jotta polymeerikuitujen toiminta betonissa olisi optimaalista, tulisi kuidun kimmomoduulin olla mahdollisimman lähellä betonin kimmomoduulia. Betonin kimmomoduuli on suuruusluokaltaan 30 GPa eli noin kolminkertainen polymeerikuituihin verrattuna. Tästä johtuen polymeerikuidun murtotapa haljenneessa betonipoikkileikkauksessa on kuitujen katkeaminen, kun teräskuidulla murtotapana on kuidun liukuminen ulos betonimatriisista. Makrokuitujen tulee venyä, ennen kuin ne voivat siirtää kuormaa halkeaman yli. Kuva 2.3 on esitelty erilaisia makropolymeerikuituja. (2)



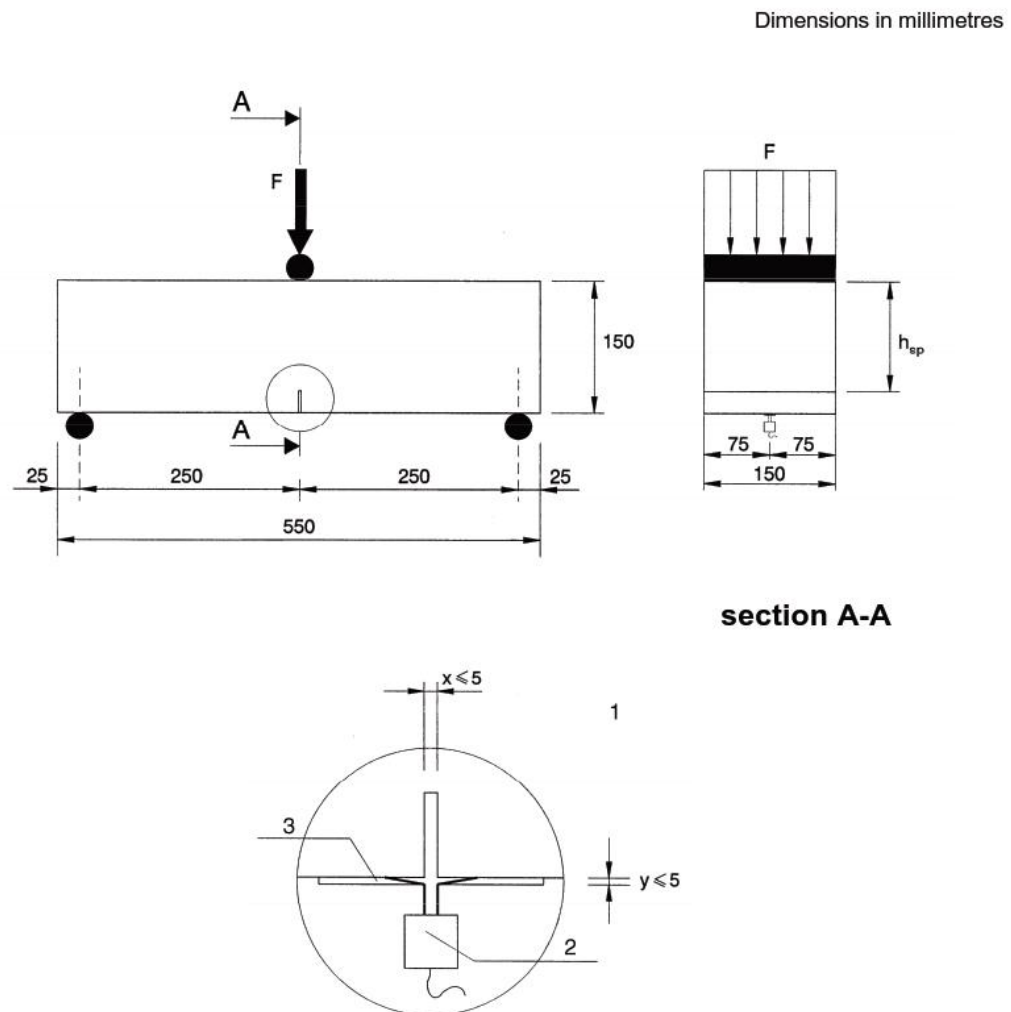
Kuva 2.3 Esimerkkejä polymeerimakrokuiduista. (2)

2.4 Kuitubetonin jäännösvetolujuuden määrittäminen

Kuidut toimivat betonissa raudoituksen tavoin, eli ne eivät lisää betonin vetolujuutta. Kun betonin vetolujuus on ylitetty, syntyy halkeama. Kuitujen suuri määrä ja tasainen jakaantuminen betonissa mahdollistaa sen, että kuituja kulkee satunnaiseen paikkaan syntyneen halkeaman yli ja nämä kuidut toimivat raudoituksen tavoin mahdollistaen vetojännitysten kulkemisen halkeaman yli. Kuitubetonille olennainen mitoituksessa käytettävä suure on jäännöstaivutusvetolujuus.

2.4.1 Jäännöstaivutusvetolujuus

Jäännöstaivutusvetolujuutta mitataan SFS-EN 14651 mukaisella palkkitestillä, jossa yksiaukkoinen palkki tuetaan päistään nivelellisesti ja palkkia kuormitetaan palkin poikki-leikkauksen suuntaisella tasan jakautuneella viivamaisella kuormalla palkin pituussuuntaa vasten. Testissä mitataan jäännöstaivutusvetolujuutta halkeamaleveyden kasvaessa. Testikokoonpano on esitetty 2.4 (8)



Kuva 2.4 Palkkitesti jäännöstaivutusvetolujuudelle. (8)

Jäännöstaivutusvetolujuudelle määritetyt R-luokat ilmaisevat kuitubetonin vähimmäisjäännöstaivutusvetolujuuden. R-luokat vastaavat eri halkeamaleveyksillä mitattuja jäännöstaivutusvetolujuuksia. Halkeamaleveyksiä kuvataan standardissa tunnuksella $CMOD_i$. Luokan R_1 arvot tarkoittavat vaadittavan jäännöstaivutusvetolujuuden minimiarvoja 0,5mm halkeamaleveydellä. Luokan R_3 arvot ovat vastaavasti jäännöstaivutusvetolujuuden minimiarvoja 2,5mm halkeamaleveydellä. Kuvassa 2.5 on esitetty R-luokat R_1 ja R_3 sekä sitkeysluokat. Luokkaa R_1 käytetään käyttörajatilan suunnittelussa. Murtorajatilan suunnittelussa edellytetään tavanomaisesti, että R_1 ja R_3 ovat kumpikin määritetty. (8, 9)

Taulukko 2.1 R-luokat ja sitkeysluokat. (9)

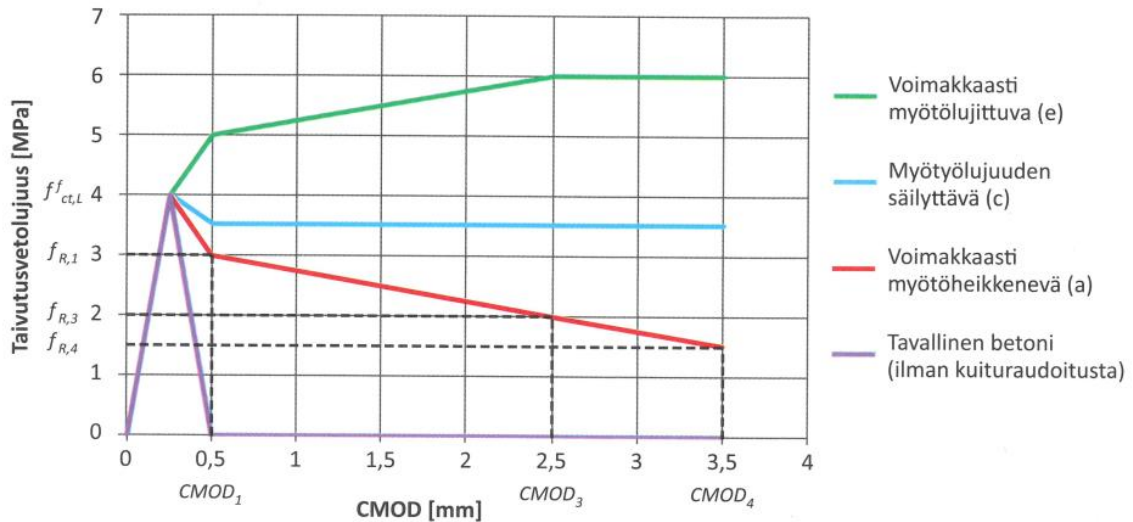
R_1 -luokka $f_{R,1}$ [MPa]	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Sitkeys- luokka (R_3/R_1)										
a (0,5–0,7)	0,5	0,8	1,0	1,3	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
b (0,7–1,0)	0,7	1,1	1,4	1,8	2,1	2,8	3,5	4,2	4,9	5,6
c (1,0–1,1)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
d (1,1–1,3)	1,1	1,7	2,2	2,8	3,3	4,4	5,5	6,6	7,7	8,8
e ($\geq 1,3$)	1,3	2,0	2,6	3,3	3,9	5,2	6,5	7,8	9,1	10,4

Merkinnät: $R_1 = f_{R,1}$
 $R_3 = f_{R,3}$

Sitkeysluokat: Luokka a: voimakkaasti myötöheikkenevä
Luokka b: myötöheikkenevä
Luokka c: myötölujuuden säilyttävä (sitkeä)
Luokka d: myötölujittuva
Luokka e: voimakkaasti myötölujittuva

Huom. 1: Lihavoidulla on merkitty kuitubetonin saatavuuden kannalta suositeltavat luokat.
Huom. 2: Jäännöstaivutusvetolujuus on ominaisarvo, joka määritetään standardin SFS-EN 14651 mukaisella palkkikokeella, kun $CMOD$ (halkeaman avautuma = crack mouth opening displacement) on 0,5, 2,5 ja 3,5 mm luokille $f_{R,1}$, $f_{R,3}$ ja $f_{R,4}$, ks. kuva 3.1. R_4 -arvoa ($= f_{R,4}$) käytetään tarvittaessa (ks. luku 2.3.2.2 (ii)).
Huom. 3: Taulukon arvoja korkeampaa jäännöstaivutusvetolujuuden arvoa voidaan käyttää, jos arvo on vahvistettu standardin SFS-EN 14651 mukaisilla koetuloksilla.
Huom. 4: Seuraavien ehtojen on täyttyvä: $C_1 = 100 \cdot f_{R,1} / f_{ctk,0,05} \geq 50 \%$ ja $100 \cdot f_{R,3} / f_{R,1} \geq 50 \%$. Ehtojen tarkoituksena on varmistaa kuitubetonin tietty minimisitkeys.

Taulukossa 2.1 on otsakevaakarivillä esitetty R_1 -luokan jäännöstaivutusvetolujuuden minimiarvoja. Otsakesarakkeessa puolestaan esitetään sitkeysluokat a-e sekä suluissa oleva lukuarvoväli, joka kuvaa jäännöstaivutusvetolujuuksien suhdetta (R_3/R_1). Taulukon vaakariveillä on esitetty R_3 -luokan jäännöstaivutusvetolujuuden arvot eri sitkeysluokissa. Sitkeysluokkien c-e tapauksissa teräskuitubetonin katsotaan toimivan taivutuksessa sitkeästi, kun myötölujuus joko säilyy tai suurenee halkeamaleveyden kasvaessa. Kuvassa 2.5 on esitetty kuitubetonin käyttäytymistä palkkitestissä. (9)



Kuva 2.5 kuitubetonin sitkeyden käyttäytyminen palkkitestissä. (9)

Standardi SFS-EN 14651 käsittelee teräskuitubetonia, mutta samaa palkkitestiä käytetään myös polymeerikuitubetonin jäännöstaivutusvetolujuuden mittaamiseen. Polymeerikuitubetonilla taivutusjäännösvetolujuudet ovat teräskuitubetonia alhaisempia ja toiminta on usein haurasta, sillä halkeilleessa poikkileikkauksessa polymeerikuidun murtomekanismi on tavanomaisesti kuidun katkeaminen toisin kuin teräskuiduilla tapahtuva kuidun liukuminen ulos betonimatriisista. (2)

2.4.2 Jäännösvetolujuus

Jäännöstaivutusvetolujuus kuvastaa taivutetun palkin vedetyn osan vetolujuutta. Tutkimuksen kohteena olevissa pinalattioissa estetyn kutistuman aiheuttama vetojännitys on lähinnä suoraa vetojännitystä. Lähteessä (9) esitetään jäännösvetolujuuden mitoitusarvon laskukaava jäännöstaivutusvetolujuuden perusteella. Tutkimuksen kohteena oleva pinalattioiden halkeilu liittyy käyttörajatilan suunnitteluun ja mitoitukseen. Käyttörajatilassa laskukaava 2 on seuraava:

$$f_{ftd,R1} = \eta_f \cdot \frac{f_{ft,R1}}{\gamma_f} \quad (2)$$

Missä:

η_f	on kerroin, jonka avulla huomioidaan kuidun suuntautuminen
γ_f	on betonin osavarmuuskerroin, joka on käyttörajatilassa 1,0
$f_{ft,R1}$	on kuitubetonin jäännöstaivutusvetolujuus

Kertoimella η_f huomioidaan kuitujen suuntautuminen ja se saa arvon $\eta_f \geq 0,5$. Mikäli betonirakenne on valettu vaakasuoraan ja kappaleen poikkileikkauksen leveys on vähintään viisinkertainen korkeuteen nähden, tulee kertoimen η_f arvoksi 1,0. Kuidut asettuvat valettaessa betoniin pääasiassa vaakasuuntaisesti. (9) Tämä on tutkimuksen kohteena olevien pinalattioiden tapauksessa positiivinen asia, sillä valu tehdään käytännössä aina vaakasuoraan ja poikkileikkaus hyvin matala suhteessa muihin dimensioihin.

2.5 Kuitumateriaalin vaikutus jäännösvetolujuuteen

Teräskuituja on käytetty betonin vahvistamisessa polymeerikuituja kauemmin. Teräskuitujen käytöstä on enemmän kokemusta ja niiden toimintaa betonissa on testattu polymeerikuituja laajemmin. Teräskuitubetonin rakenteellista käyttöä on tutkittu ja erilaisia suunnitteluohteita teräskuitubetonin käyttöön on laadittu. Teräskuitubetonin jäännösvetolujuudesta on paljon tietoa ja sitkeää toimintaa ymmärretään.

Polymeerikuitubetonin jäännösvetolujuudet ovat pääsääntöisesti teräskuitubetonia alhaisempia johtuen kuitujen materiaalieroista. Tämän lisäksi polymeerikuiduilla vahvistetun betonin toiminta ei ole yhtä sitkeää kuin teräskuitubetonilla, sillä polymeerikuidun murtomekanismi on katkeaminen, kun haljenneeseen poikkileikkaukseen kohdistetaan vetoa. (2)

Eri kuitumateriaaleilla ja annosmäärillä saatavat jäännösvetolujuuden arvot annetaan kunkin kuitutuotteen käyttöselosteessa. Tutkimuksen laskelmien kannalta ei eri kuitumateriaaleilla tai määrillä saatavilla jäännösvetolujuuden arvoilla ole merkitystä, sillä tutkimuksen laskelmissa perehdytään halkeamaleveyksiin jäännösvetolujuuden funktiona.

2.6 Kuitujen määrä betonissa

Kuitubetonin jäännösvetolujuudelle on oleellista syntyvän murtumakohdan yli kulkevat kuidut. Koska kuidut jakautuvat betoniin satunnaisesti, vaaditaan kuituja riittävästi, jotta satunnaisessa murtumakohdassa on riittäväällä todennäköisyydellä riittävä määrä kuituja. Teräskuiduille tyypillinen annosmäärä on 25-60 kg/m³. Polymeerikuituja käytetään karkeasti kymmenesosa ja niiden tyypillinen annosmäärä on 2-9 kg. Tarkemmat annosmäärät on ilmoitettu kuitujen käyttöselosteissa. (10)

3 Kiinnitetyt pintabetonilattiat

Pintabetonilattialla tarkoitetaan ei-rakenteellista betonilattiaa, joka on pääsääntöisesti alustansa kiinnitetty.(4) Tällöin pinalattian ja valettavan alustan välille syntyy tartuntaa, jonka voimakkuuteen vaikuttaa pinalattian ja kantavan rakenteen välisen rajapinnan ominaisuudet.(11) Yleisimmin kiinnitettyjä pinalattioita valetaan ontelolaattojen tai muiden elementtilaattojen päälle runkoratkaisuun sidottuna työvaiheena. Lattiaelementit kuten ontelolaatat ovat yleensä esijännitetyjä ja omaavat täten jonkinlaisen alkukaarevuuden. Pintavalun pääasiallinen tavoite on tasoittaa lattian epätasaisuudet ja tuottaa tasainen sekä kestävä lattiapinta. (4)

Pinalattia voidaan toteuttaa alustastaan irrotettuna kelluvana laattana. Alustastaan irrotetut pinalattiat rajataan kuitenkin tutkimuksen ulkopuolelle, koska irrotetun pinalattian tarkoitus on sallia kutistuminen, jolloin estetty kutistuma ei aiheuta halkeilua. Alustaan kiinnitetty pinalattia voidaan suunnitella joko liittorakenteisena tai ei-rakenteellisena laattana. Tutkimus rajataan koskemaan ei-rakenteellisia kiinnitettyjä pinalattioita, koska polymeerikuitujen käyttö rakenteellisena raudoituksena ei ole sallittua kantavissa rakenteissa. (4)

Kiinnitetyn pinalattian haasteina ovat betonin kutistumishalkeilu sekä pinalattian irtoaminen alustastaan, sillä kiinnitetty pinalattia on tartunnan vuoksi estetyn kutistuman tilassa. Tästä johtuen betonin koostumuksessa pitäisi huomioida kutistuman minimoiminen. Estetyn kutistuman aiheuttamien vetojännitysten lisäksi kantavan rakenteen kuormituksesta aiheutuvat momentit aiheuttavat laatan kentässä ja tuilla puristusta ja vetoa laatan pintaan sekä pinalattiaan. (4)

Pinalattian tartunta alustaan on lattian mitoituksen kannalta keskeinen tekijä. Pinalattiat jaotellaan täydellisen tai osittaisen tartunnan omaaviin lattioihin. Täydellisen tartunnan tapauksessa pintabetonin halkeilu jakautuu tiheästi ja halkeamat ovat pieniä. Osittainen tartunta katsotaan toteutuksen kannalta epäonnistuneeksi. Tartunnan ollessa epätäydellinen halkeamanleveys ja halkeamien välit kasvavat, sillä kutistumisliike kerääntyy yhteen halkeamaan suuremmalta alueelta. Myös halkeamien tai saumojen reunojen nousua voi esiintyä, josta puolestaan voi aiheutua pintabetonin murtumia. (4)

Ei-rakenteellisissa pinalattioissa mitoitus tehdään ainoastaan halkeilulle. Halkeilun suuruutta rajoittaa lattian käyttötarkoitus, ympäristörasitukset sekä mahdolliset visuaaliset vaatimukset. Mitoitukseen vaikuttavia tekijöitä ovat tartunnan aste, laatan paksuus, betonin kutistuma, sekä sallitun halkeamanleveyden suuruus. (4)

Pinalattia voidaan toteuttaa raudoittamattomana, mutta vähintään palkkien ja kantavien seinälinjojen ylitykset tulee raudoittaa. Teräspalkkien päälle tukeutuvien ontelolaattojen tapauksessa pinalattian halkeilun riski korostuu, sillä teräspalkit ovat notkeita eivätkä kutistu. Pinalattia sitoo teräspalkkiin tukeutuvat ontelolaatat muutaman elementin levyisiksi kaistaleiksi, joiden välille syntyy tavallista suurempi kutistumishalkeama. Laatan tukialueiden sekä muiden erityisalueiden vaatima raudoitus rajataan tutkimuksen ulkopuolelle. (4)

3.1 Pintalattian paksuus

Ei-rakenteellisen pintalattian paksuus valitaan käytännön tekijöiden perusteella. Näitä ovat esimerkiksi kaadot, alustan epätasaisuudet sekä tartunnan toteuttaminen. Esimerkiksi ontelolaattojen päälle valettaessa ontelolaattojen alkukaarevuus tulee huomioida, jotta pintalattian paksuus on kauttaaltaan riittävä. Myös kiviaineen maksimiraekoko vaikuttaa pintalattian paksuuteen. Paksuuden tulisi olla nelinkertainen maksimiraekokoon nähden. (4)

Raudoittamattomat pintalattiat voidaan toteuttaa noin 40-80 mm paksuina. Ohjepaksuus on noin 40-50 mm. Raudoittamattoman pintalattian toteutuksessa tulee varmistua hyvästä tartunnasta. Raudoittamattoman pintalattian halkeamaleveys sekä halkeamien välinen etäisyys kasvavat pintavalun paksuuden kasvaessa. Pintalattian raudoitustarvetta voidaan arvioida betonin vapaan kutistuman sekä sallitun halkeamaleveyden perusteella. Raudoittamattomat pintalattiat rajataan tutkimuksen ulkopuolelle. (4)

Verkolla tai kuiduilla raudoitetussa pintalattiassa raudoitus tai kuidut jakavat halkeilua tiheämmäksi ja pienentävät halkeamaleveyksiä, mikäli asetettuihin halkeilun raja-arvoihin ei päästä raudoittamattomalla rakenteella. Raudoituksella ei voida estää betonin halkeilua, sillä raudoitus alkaa toimia vasta betonin haljettua. (4)

3.2 Pintalattian laatuvaatimukset

Suomen Betoniyhdistyksen Betonilattiat 2014 – teoksessa käsitellään betonilattioiden laatuvaatimuksia. Laatuvaatimusten esittämiseksi on kehitetty betonilattioiden luokitusjärjestelmä, jonka tarkoituksena on esittää lattian käytölle merkittävät ja mitattavissa olevat laatuvaatimukset. Luokitusjärjestelmän laatuvaatimukset ovat suoruus, kulutuskestävyys ja halkeamaleveys. Taulukossa 3.1 on esitetty suurimmat suositeltavat halkeamaleveydet eri halkeamaleveysluokille. (4)

Taulukko 3.1 Suositeltavat suurimmat sallitut halkeamaleveydet maanvaraisissa lattioissa ja pintabetonilattioissa. (4)

	Halkeamaleveysluokka			
	I	II	III	IV
Kuvaus	Vaativa	Normaali	Merkityksetön	Erikoisluokka
Sallittu halkeamaleveys (mm)	0,3	1,0	Ei vaatimusta	Ilmoitetaan erikseen

Varsinaisen luokitusjärjestelmän lisäksi on määritelty erikseen luokittelemattomia laatutekijöitä, joita käytetään tarvittaessa luokitusjärjestelmän lisänä. Kokonaisuudessaan teos listaa betonilattioille seuraavat laatuvaatimukset: (4)

- suoruus
- kulutuskestävyys
- halkeilu
- säilyvyys
- pölyämättömyys
- puhdistettavuus ja hygieenisuus
- iskunkestävyys
- kemiallinen kestävyys
- liukkaus
- ulkonäkö
- kosteus (pinnoitettavuus)
- sähkönjohtavuus
- lammikoitumattomuus

Laatuvaatimukset määräytyvät tapauskohtaisesti lattian käyttötarkoituksen mukaan. Tutkimuksen kannalta oleellinen laatuvaatimus on lattian halkeilu. Halkeilun lisäksi tärkeitä laatuvaatimuksia ovat ulkonäkö sekä pinalattian tartunta alustaan. Halkeilu heikentää betonin tiiveyttä sekä kulutuskestävyyttä. Halkeilleen betonin alhaisempi tiiveys mahdollistaa kosteuden, sekä muiden aineiden pääsyn halkeamaan, joka nopeuttaa terästen korroosiota. Halkeaman reunat voivat myös lohkeilla ja murtua esimerkiksi trukki liikenteen takia, mikä voi puolestaan kasvattaa halkeaman kokoa ja siitä aiheutuvaa haittaa. Halkeilu vaikuttaa myös haitallisesti lattian ulkonäköön, mikäli betonipinta jää näkyviin, joten myös ulkonäkösyistä voi seurata vaatimuksia halkeamanleveyden ja halkeamien määrän suhteen. Kiinnitetyn laatan tartunta puolestaan vaikuttaa pinalattiaan syntyviin vetojännityksiin ja halkeiluun. (4)

3.2.1 Pinalattian halkeilu

Pinalattian halkeilu johtuu pintaan valetun estetystä kutistumasta. Betonin kutistuman suuruus on ajasta riippuvainen, minkä takia nuorempi pinalaatan betoni kutistuu kantavaa betonirakennetta enemmän. (4) Pintabetonin ja alustan välinen kitka rajoittaa pintabetonin vapaata kutistumaa, mikä synnyttää betoniin vetojännitystä, joka ylittäessään vetolujuuden synnyttää halkeaman. (4, 12) Halkeamalla tarkoitetaan betonin pinnalta mitattuja yli 0,05 mm leveitä halkeamia. (4)

Tutkimuksessa tarkasteltavat pintabetonilattiat ovat ei-rakenteellisia betonilaattoja, joiden halkeamilla ei ole rakenteellista merkitystä. Täysin halkeamattoman lattian toteuttaminen ei yleensä ole perusteltua vaan halkeilua rajoitetaan laatuvaatimusten puitteissa. Sallittua halkeamaleveyttä rajoittavat esimerkiksi ulkonäkövaatimukset ja tiiveysvaatimukset. Halkeamaleveysvaatimukset perustuvat kansallisiin standardeihin ja suunnitteluohjeisiin. (4)

Lähteessä (10) on esitelty betonilattioiden suurimmat suositeltavat halkeamaleveydet luokittain. Luokassa I-UA lattiapinta on lähes täysin halkeilematon tai siinä on yksittäisiä erit-

täin kapeita halkeamia, joiden suuruusluokka on 0,1-0,2 mm. Käyttökohde on päällystämättömät lattiat, joilla on erittäin tiukka ulkonäkövaatimus. Luokassa I-UB suositeltavat halkeamaleveydet ovat 0,1-0,3 mm ja ulkonäkövaatimukset ovat lievempiä. Luokat I-UA sekä I-UB käsittelevät halkeilua ulkonäön näkökulmasta. (10)

Luokka I-K rajoittaa halkeamaleveydet maksimissaan 0,3 millimetriin ja luokka käsittelee kulutuskestävyyden suhteen vaativia lattioita. Luokassa II tai III ei ole erityisvaatimuksia ulkonäön tai kulutuskestävyyden suhteen ja niiden suurimmat suositeltavat halkeamaleveydet ovat vastaavasti 0,5 mm sekä 1 mm. Luokka IV on erikoisluokka, jolle ei ole asetettu erillisiä vaatimuksia. (10)

3.2.2 Pintalaatan tartunta alustaan

Tartunnalla tarkoitetaan pintabetonin ja alusbetonin rajapinnan kohtisuoraa vetolujuutta. Pintalattian laatuun vaikuttavista tekijöistä hyvä tartunta on kaikista tärkein. Tartunnan laatu varmistetaan tavanomaisesti vetokokeilla. (4)

Tutkimuksen kannalta kohtisuoraa vetolujuutta tärkeämpää on tietää rajapinnan kyky vastustaa leikkausvoimaa. Kutistuessaan pintabetoni pyrkii liikkumaan suhteessa alustaan, mistä syntyy pintabetonin ja kantavan betonirakenteen väliseen rajapintaan leikkausjännityksiä. Rajapinnan kykyä siirtää leikkausvoimaa voidaan kuvata pintabetonin ja alustan välisenä kitkakertoimena. (11)

Pintalaatan tartuntakoe suoritetaan standardin SFS 5446 mukaan lieriön muotoiselle rakenteen läpi poratulle kappaleelle. Koepaloista mitatun keskiarvon tulee 30 vuorokauden iässä olla vähintään 1 MN/m² (MPa). Yksittäiset koetulokset eivät saa poiketa mitatusta keskiarvosta yli 20% ellei näytteessä ole havaittavissa näytteen laatua heikentäviä seikkoja esimerkiksi yksittäistä suurta kiveä.

Lähteessä (13) kerrotaan, että pintalattian ja alustan välisen tartunnan arvon tulisi olla yleensä vähintään 1,5 MPa, jotta halkeilua voidaan onnistuneesti rajoittaa ja jotta pintalattian ja alustan välisen tartunnan irtoaminen voidaan välttää. Valettaessa aiemmin valetun betonipinnan päälle tulee alusta kostuttaa ns. mattakosteaksi, jotta hyvä tartunta voidaan saavuttaa. (13) Tutkimuksen laskelmissa tartuntajännityksen arvoina käytetään arvoja 1 MPa, 1,5 MPa ja 2 MPa, jotka edustavat suuruusluokaltaan kirjallisuuslähteiden ohjeistamia tartuntalujuuden arvoja.

3.2.3 Ulkonäkö

Lattian ulkonäkövaatimukset selvitetään tapauskohtaisesti, mikäli lattialle asetetaan ulkonäkövaatimuksia.(4) Tutkimuksen kannalta keskeinen ulkonäkökriteeri on halkeilu. Estetyn kutistuman aiheuttamien halkeamien lisäksi myös plastisen kutistuman aiheuttama pintahalkeilu aiheuttaa visuaalista haittaa.(4) Tutkimuksessa keskitytään kuitenkin ainoastaan estetyn kutistuman aiheuttamaan halkeiluun, joka johtuu betonin vetojännityksen ylittäessä vetolujuuden.

Kuitubetonin tapauksessa ulkonäköön vaikuttaa myös betonin pintaan nousevat kuidut. Polymeerikuitujen tapauksessa pinnassa olevien kuitujen poistaminen on teräskuituja helpompaa, sillä mekaanisen poistamisen sijaan kuidut voidaan esimerkiksi polttaa. (2) Pintaan jäävien kuitujen määrään voidaan vaikuttaa esimerkiksi pintatärytyksellä, pintaan levittävällä sirotteella tai valamalla ohut betonikerros ilman kuituja. (4)

3.3 Lattioiden kuormat

Lattioiden kuormat luokitellaan pysyviin kuormiin tai muuttuviin kuormiin eli hyötykuormiin. Pysyvät kuormat käsittävät yleensä rakenteiden oman painon. Muuttuviin kuormiin eli hyötykuormiin sisältyy esimerkiksi liikennekuormat, tavarakuormat sekä henkilökuormat. Tutkimuksen kannalta oleelliset lattian kuormat pitävät sisällään kutistuman ja viruman aiheuttamat kuormat sekä lämpötilanvaihtelun aiheuttamat kuormat. Kutistuman sekä viruman aiheuttamat kuormat käsitellään pysyvänä kuormana. Lämpötilan muutoksista aiheutuneet kuormat ovat lyhytaikaisia. Myös kovettumisen aikaiset lämpötilan vaihtelut on otettava suunnittelussa huomioon, mikäli lämpöliike on estetty. (4)

3.3.1 Kitkavoimat

Kutistumisen ja lämpötilan aiheuttamista muodonmuutoksista aiheutuu pintabetonilattioiden kitkaa pintabetonin ja kantavan rakenteen rajapintaan. Kitkakertoimen suuruus rajapinnassa voidaan määrittää liukukokein ja kitkakertoimien arvoja erilaisille alustoille on kokeiden perusteilla määritetty. Kitkakertoimen käytön edellytyksenä on, että alusta pinta-alan alla on riittävän tasainen. Taulukossa 3.2 on esitetty kitkakertoimia tyypillisille betonilattioiden alustoille. (4)

Taulukko 3.2, Kitkakertoimia betonilattioiden tyypillisille alustoille. (11)

Kitkakerroin alustan ja betonilaatan välillä	tartunta- laasti	suora kontakti	1-kerros muovikalvo	2-kerros muovikalvo	bitumi
karkea sepeli		1,3	0,9	0,8	0,6
tasaushiekka		0,9	0,6	0,5	0,5
teräshierretty alusbetoni	1,1	1,0	0,9	0,7	0,7
karhea alusbetoni	1,3	1,2	1,0	0,8	0,6
EPS	1,0	0,9	0,7	0,5	0,5

4 Betonin kutistuminen ja kutistumishalkeilu

Kutistuminen on betonin ajasta riippuva materiaaliominaisuus, jonka pääasiallinen syy on veden poistuminen betonista tai sen siirtyminen pienistä huokosista suurempiin. Työstettyvyyden takia betonissa käytetään enemmän vettä, kuin mitä hydrataatioreaktioissa betoniin kemiallisesti sitoutuu. Tavanomaisesti rakennebetoneissa käytetyn veden määrä on noin kaksinkertainen tarvittuun määrään nähden. Myös betonissa olevan sementin kemiallinen sitoutuminen veden kanssa, eli hydrataatioreaktiot aiheuttavat kutistumaa, sillä sementin ja siihen reagoivan veden yhteenlaskettu tilavuus on suurempi kuin hydrataatioreaktioiden lopputuotteiden yhteenlaskettu tilavuus. (12)

Betonin pitkäaikaiskutistuma on huomioitu betonirakenteiden mitoituksessa ja suunnittelussa jo kauan. Oletuksena betonin kutistumasta 35 % tapahtuu ensimmäisen kuukauden aikana valusta ja 80 % kutistumasta on tapahtunut kolmessa kuukaudessa. Noin vuoden jälkeen betoni kutistumasta on tapahtunut noin 90 % ja loput kutistumassa aiheutuvat jopa vuosien kuluttua. Betonin pitkäaikainen kutistuma on materiaaliominaisuus eikä sitä voida estää. Jälkihoidolla kutistumaa voidaan siirtää myöhemmäksi jolloin esimerkiksi halkeiluun voidaan mahdollisesti vaikuttaa. (14)

4.1 Betonin kutistumalajit

Betonin kutistuminen voidaan jakaa ajallisesti kahteen päävaiheeseen, varhaisvaiheen kutistumaan sekä myöhäisvaiheen kutistumaan. Varhaisvaiheen kutistuma tapahtuu välittömästi valun jälkeen ennen betonin kovettumista alle vuorokauden sisällä valusta. Varhaisvaiheen kutistumalla tarkoitetaan betonin plastista sekä autogeenistä kutistumaa. Myöhäisvaiheen kutistuma tapahtuu yli vuorokausi valun jälkeen ja se voi jatkua vuosia valun jälkeen. Myöhäisvaiheen kutistuma aiheutuu lämpömuodonmuutoksista sekä betonin kuivumiskutistumasta. (12, 14)

Valun jälkeen tuoreessa betonissa kiinteä aines pyrkii erottumaan ja painumaan alaspäin, jolloin kevyempi vesi nousee kohti betonin pintaa. Mikäli olosuhteet sallivat, pinnalle noussut vesi haihtuu betonipinnasta ja betonipinta voi kuivua. Betonipinnan kuivuminen aiheuttaa kutistumista, josta voi seurata halkeamia, sillä betoni ei ole vielä kemiallisesti sitoutunut eikä betonilla ole vielä lujuutta. Tätä ilmiötä kutsutaan plastiseksi kutistumiseksi. Toinen valun jälkeen tapahtuva kutistumista aiheuttava tekijä on betonin hydrataatio. Hydrataatiossa betonissa oleva vesi sitoutuu kemiallisesti sementin kanssa. Hydrataatiotuotteiden tilavuus on pienempi, kuin veden ja sementin yhteenlaskettu tilavuus, jonka seurauksena betoni pyrkii kutistumaan. (12)

Kovettuneessa betonissa tapahtuvaa kutistumista kutsutaan kuivumiskutistumiseksi. Ylimääräinen vesi haihtuu betonin pinnalta tai liikkuu betonin sisällä pienistä huokosista suurempiin. Mikäli kutistuma estetään, betoniin syntyy vetojännityksiä. Mikäli syntyvien vetojännitysten suuruus ylittää betonin vetolujuuden, syntyy betoniin halkeamia. Halkeilun riski on suuri myös betonin lujuudenkehityksen aikana, kuivumisen aiheuttaman kutistumisen synnyttämät vetojännitykset kilpailevat lujuudenkehityksen kanssa. (12)

Kokemusperäisesti on havaittu, että haitallisten halkeamien välttämiseksi kokonaiskutistuman suuruus saa olla enintään noin 0,5 mm/m. Tämän lisäksi vaaditaan rauhallisia olosuhteen muutoksia betonissa.

4.1.1 Plastinen kutistuma

Plastinen kutistuma on betonin halkeilun kannalta merkittävin kutistumatekijä. Plastisen kutistuman suuruus voi olla 0-5 promillea.(14) Plastista kutistumista tapahtuu noin 12 tunnin aikana valusta betonin ollessa plastisessa tilassa, eli ennen kuin betoni on kemiallisesti sitoutunut.(4)

Plastisessa vaiheessa betonissa tapahtuu erottumista, jossa raskaampi kiviaines painuu alemmas ja kevyempi vesi nousee betonin pinnalle. Plastinen kutistuminen on seurausta tilanteesta, jossa vesi haihtuu betonipinnalta nopeammin, kuin vesi siirtyy betonista, jolloin betoni kuivuu. Kuivuessaan betonipinta kutistuu ja siihen syntyy vetojännityksiä, joista aiheutuvia halkeamia kutsutaan plastisiksi kutistumishalkeamiksi. (4, 12)

Plastisen kutistuman riski on suuri erityisesti tuulisella ja aurinkoisella säällä, kun veden haihtuminen betonipinnalta on voimakasta. Tuulinen ja kylmä sää aiheuttaa myös ongelmia, sillä kylmällä säällä veden nousu betonipintaan hidastuu ja tuuli lisää veden haihtumista. Hankalissa olosuhteissa betonipinta tulisi suojata hyvin. Plastinen kutistuma on ongelmallista erityisesti matalan vesi-sementtisuhteen betoneissa, joissa betonin pinnalle ei pääse nousemaa riittävästi vettä korvamaan pinnalta haihtunutta vesimäärää. (14)

Halkeilun kannalta plastisen kutistuman aiheuttamat halkeamat ovat ongelmallisia. Plastiset halkeamat ovat vain muutamia millemä syviä, eikä niitä välttämättä havaita jälkihoidon aikana. Plastiset halkeamat voidaan lattiapinnalta hiertää piiloon, mutta halkeamakohtaan jää silti heikkousvyöhyke betonin myöhäisvaiheen kutistumisen aiheuttaman halkeilun kannalta. Tällöin ne tulevat näkyviin jälkikäteen. Plastiset halkeamat ovat tavanomaisesti lähinnä esteettinen häiriö. Mikäli plastiset halkeamat pysyvät pintahalkeamina, eivätkä kasva, ei niistä tule ongelmaa. (14)

4.1.2 Autogeeninen kutistuma

Autogeeninen kutistuma tarkoittaa betonin hydrataatioreaktion aiheuttamaa kutistumaa. Betonin hydrataatiossa sementti reagoi kemiallisesti betonissa olevan veden kanssa. Reaktiotuotteena syntyvän sementtikiven tilavuus on pienempi, kuin lähtötuotteiden yhteenlaskettu tilavuus, josta seuraa betonin kutistumaa. Autogeeninen kutistuma kasvaa vesi-sementtisuhteen laskiessa. Autogeeninen kutistuma on merkittävää käytännössä alle 0,45 vesi-sementtisuhteella, joka on alhaisempi, kuin lattiabetoneiden vesi-sementtisuhte yleensä. (4)

Tavanomaisesti autogeeninen kutistuma ei ole lattiabetoneissa merkittävää. Erikoistapauksissa esimerkiksi kloridirasitetuissa betonirakenteissa vesi-sementtisuhdetta voidaan rajoittaa ja autogeeninen kutistuma voi olla suunnittelun kannalta merkittävää. (4)

4.1.3 Kuivumiskutistuma

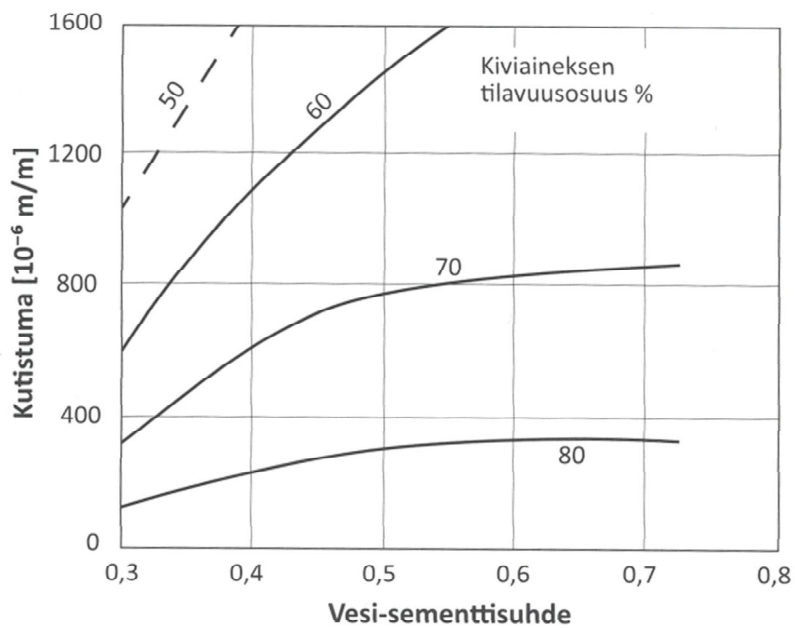
Kuivumiskutistuma on betonin materiaaliominaisuus. Betoni kutistuu kuivuessaan, sillä betonista haihtuva vesi pienentää betonin tilavuutta. Kuivumiskutistuma tunnetaan ilmiönä hyvin ja se huomioidaan suunnittelussa. Kuivumiskutistumaan vaikuttavia tekijöitä ovat betonin koostumus sekä ympäristön kosteuspitoisuus. Myös jälkihoidolla voi olla vaikutusta kuivumiskutistuman suuruuteen. Pitkä jälkihoitoaika ei käytännössä vähennä kuivumiskutistumaa, mutta liian lyhyt jälkihoito lisää kuivumiskutistuman suuruutta. (4)

Suomalaisen kivianeen veden absorptiokyky on pieni ja kutistuma erittäin vähäinen. Kuivumiskutistuma johtuu täten sementtipastan ominaisuuksista ja kutistuman suuruus riippuu sementtipastan määrästä sekä ominaisuuksista. (4)

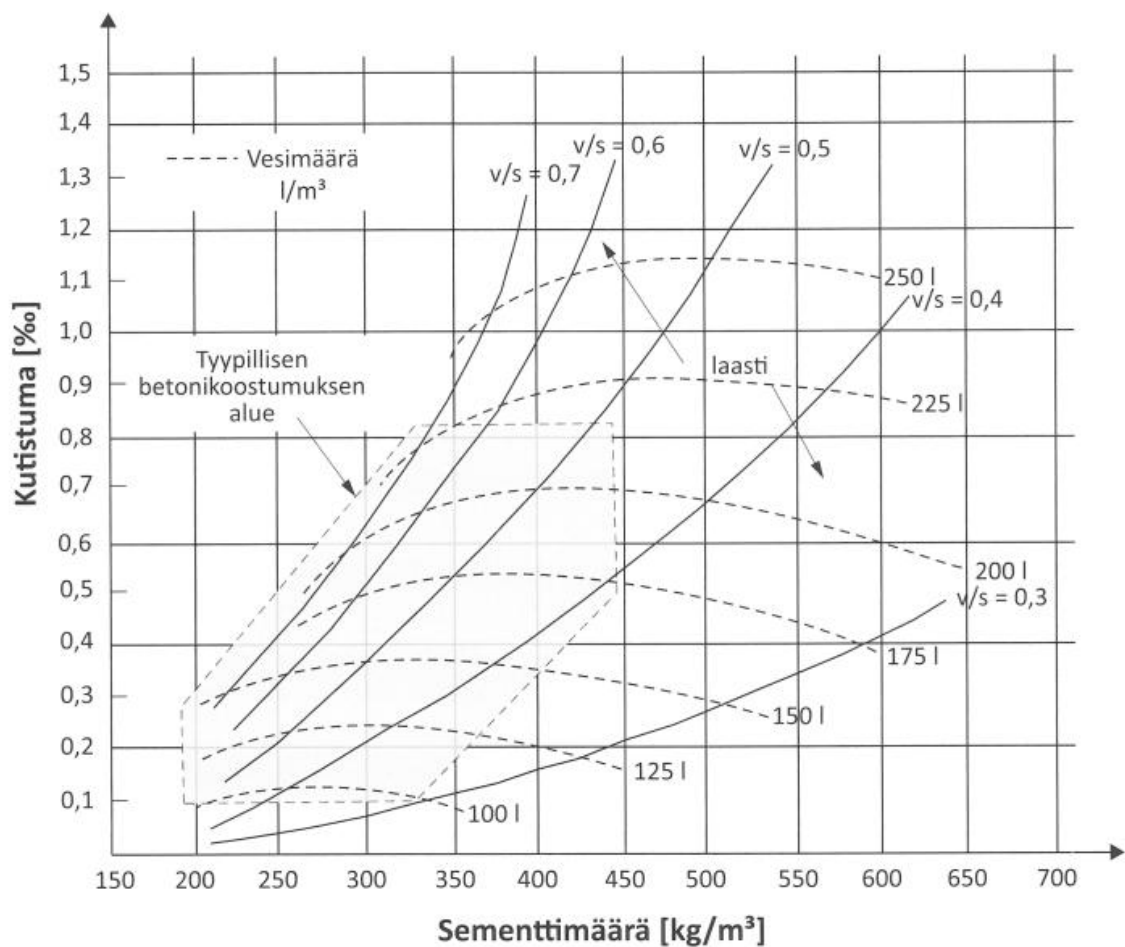
Betonin kuivumisen ja sitä kautta kutistuman katsotaan alkavan tavanomaisesti jälkihoidon päätyttyä. Kuivumiskutistumasta noin 35% tapahtuu ensimmäisen kuukauden aikana ja 90 % ensimmäisen vuoden aikana. Kuivumiskutistuman suuruus on 0,5-1,5 mm/m (0,05-0,15 %), joskin normaaleilla betoneilla kuivumiskutistuma ei yleensä ylitä 0,8mm/m. Normaali-betonia suurempia kuivumiskutistumia esiintyy yleensä voimakkaasti kutistuvilla paljon vettä ja sementtiä sisältävillä betoneilla sekä aikaisin alkaneen voimakkaan kuivumisen seurauksena. (4)

Kuivumiskutistuman suuruuteen vaikuttaa ympyröivän ilman suhteellinen ilmankosteus. Ilman lämpötila ei vaikuta kutistuman suuruuteen, mutta lämpö nopeuttaa kuivumista. Kutistumisnopeuteen vaikuttaa pääasiassa kosteuden diffuusio betonin sisältä betonin pinnalle. Ilman suhteellinen kosteus vaikuttaa kosteuden haihtumiseen betonista. Suhteellisen ilmankosteuden ollessa selvästi alle 50 %, nopeutuu haihtuminen betonista merkittävästi. (4)

Pastan määrän vähentäminen on tehokas keino kuivumiskutistuman pienentämiseksi. Normaali-betonilla kiviaineksen määrä on 55-75 % tilavuudesta, mutta lattiabetoneissa kiviaineksen maksimimäärä rajoittuu noin 65 % betonin tilavuudesta pumpattavuuden ja valettavuuden takia. Betonilattiat 2014 – teos määritelmä betonipastan sisällölle on sementti, seosaineet, vesi, lisäaineet ja hieno filleri ($<0,125$ mm). Kuivissa 4.1 ja 4.2 on kuvattu vesi-sementtisuhteen ja sementin määrän vaikutuksia betonin kutistumaan. (10)



Kuva 4.1 Suuntaa antava vesi-sementtisuhteen sekä sementtipastan määrän vaikutus betonin kutistumaan (10)



Kuva 4.2 Sementin ja veden määrän vaikutus kutistumaan (10)

Yhdysvalloissa ja Suomessa on tutkittu mineraalijauheiden käyttöä sementin korvikkeena, jotta kutistumaa voitaisiin pienentää työstettävyyden kärsimättä. Keino on havaittu toimivaksi, mutta käytännön ongelmana suomessa on valmisbetonitehtaiden siilokapasiteetti, jonka takia betonin suhteittamiseen käytettävien fraktioiden määrä on rajallinen.

Lattiabetoneissa kuivumiskutistuman pienentämiseksi tehtävät toimenpiteet ovat rajallisia, sillä betonin työstettävyys ja lattialle asetetut viimeistelyvaatimukset asettavat reunaehdoja betonin koostumukselle. Lattian paksuuden kasvaessa kuivuminen hidastuu ja kuivumiskutistuman loppuarvo jää pienemmäksi. Kuivumiskutistuman pienentäminen rakennepaksuutta kasvattamalla ei kuitenkaan ole taloudellisesti järkevää. (4)

Kuivumiskutistumaa voidaan betonilattioissa rajoittaa sopivalla betonin koostumuksella. Mahdollisimman karkean kiviaineksen käyttö on suositeltavaa ja suhteituksessa tulisi olla mahdollisimman paljon 12-36 mm kiveä. Lattiarakenteissa lisähaasteita tuo kuivumisnopeuden vaihtelut lattialaatan eri alueilla. Epäsymmetrisen muotoinen rakenne kuivuu epätasaisesti ja rakenteeseen voi syntyä jännityksiä. Betonilattioissa tämä ilmenee esimerkiksi vapaiden nurkkien nousuna ylöspäin tai nurkkien halkeiluna, mikäli muodonmuutokset on estetty. (4)

4.1.4 Lämpötilan vaihtelun aiheuttamat muodonmuutokset

Kovettuneen betonin lämpömuodonmuutos on n. 0,01 mm/m kun lämpötila muuttuu yhden asteen. Lämpötilan laskemisen aiheuttama kutistuminen voi aiheuttaa halkeilua, kuten muukin kutistuma. Esimerkiksi kesäaikana ulos valetun betonirakenteen lämpötila voi laskea kymmeniä asteita talvipakkasilla. (4) Tutkimuksen painopiste on lattiarakenteissa ja suuret lämpötilaeron aiheuttamat muodonmuutokset rajataan tutkimuksen ulkopuolelle.

Vähemmän tunnettu, mutta tutkimuksen kannalta merkityksellinen ilmiö on hydrataatioreaktion tuottaman lämmön aiheuttama lämpötilan nousu ja siitä aiheutuvat lämpömuodonmuutokset. Hydrataatioreaktio vapauttaa lämpöä, mikä nostaa kovettuvan betonin lämpötilaa. Kovettumisreaktioiden hidastuessa lämpötila alkaa laskea, jolloin betoni kutistuu. Jäähtyminen alkaa rakenteen pinnasta, jolloin pintaan voi muodostua vetojännityksiä, joista voi puolestaan seurata halkeamia. Maanvaraisilla lattioilla hydrataatiolämmön aiheuttamat halkeamat ovat epätavallisia, sillä rakennepaksuudet ovat pieniä ja lämpötilat alhaisia. Vanhaan rakenteeseen jäykästi valettaessa uuden betonin lämpötila voi nousta hydrataation seurauksena merkittävästi, jolloin rakenteen jäähtyessä estetty kutistuma voi aiheuttaa halkeilua. (4)

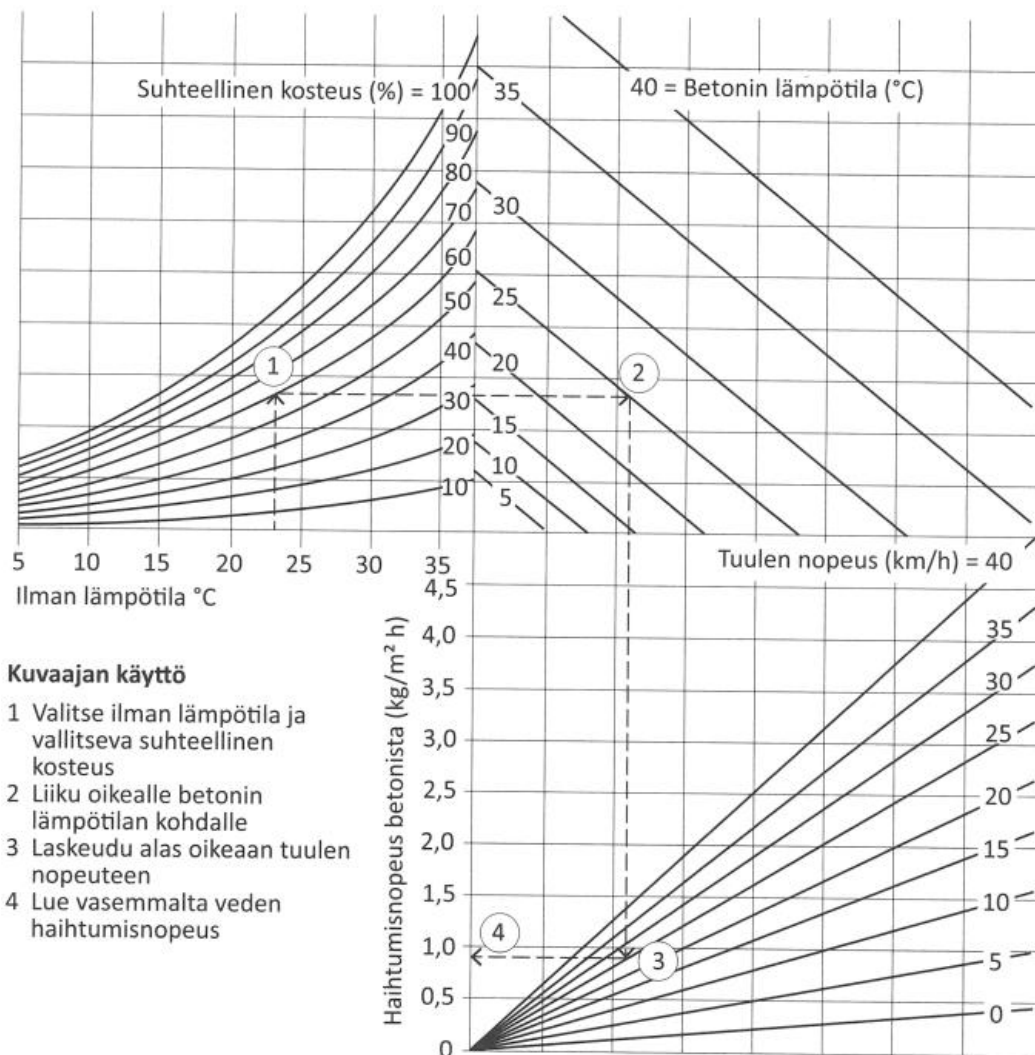
4.2 Kuivumiskutistumaan vaikuttavat tekijät

Betonin kuivumiskutistumaan vaikuttavat tekijät voidaan jakaa ulkoisiin ja sisäisiin tekijöihin. Sisäisiin tekijöihin kuuluu betonin ominaisuudet kuten suhteitus, lisäaineet ja muut betonin osa-aineet. Ulkoisiin tekijöihin lasketaan puolestaan ympäristön olosuhteiden sekä betonirakenteen muodon vaikutus kuivumisnopeuteen. (14)

4.2.1 Ulkoiset tekijät

Betonirakenteen kutistumisen kannalta tärkeimmät tekijät ovat ympäristön olosuhteet, jälkihoito sekä betonirakenteen muoto. Ympäristötekijöiden vaikutus veden haihtumisnopeuteen betonipinnalta on suuri. Näitä tekijöitä ovat muun muassa ilman lämpötila, suhteellinen kosteus sekä tuulen voimakkuus. Tekijöiden erilaiset yhteisvaikutukset vaikuttavat vaihtelevasti veden haihtumisnopeuteen. Mitä suurempi veden haihtumisnopeus on, sitä enemmän ja sitä nopeammin betonirakenne kutistuu. (14)

Ilmankosteus vaikuttaa betonin kuivumisnopeuteen sekä lopullisen kutistuman suuruuteen. Mitä korkeampi ilmankosteus on, sitä vähemmän betoni pyrkii kutistumaan. Veden haihtumisnopeuteen betonista on kehitetty nomogrammi, jolla haihtumisnopeutta voidaan arvioida kun tunnetaan ilman lämpötila ja kosteus, betonin lämpötila sekä tuulennopeus. Kuvassa 4.3 on esitetty nomogrammi kuivumisnopeuden arvioimiseksi. (14)



Kuva 4.3, kuivumisnopeuden määrittäminen. (13)

Betonin kutistuman ja lujuudenkehityksen kannalta sopiva lämpötila on 10-20 celsiusastetta. Korkeammat lämpötilat kasvattavat betonin vedentarvetta, mikä puolestaan johtaa muutoksiin betonin lujuudenkehityksessä. Matalammat lämpötilat puolestaan hidastavat lujuu-

denkehitystä ja lisäävät kutistumishalkeilun riskiä. Lämpötila tulee myös olla mahdollisimman tasainen, jotta lämpömuodonmuutosten aiheuttamilta ongelmilta välttyttäisiin. (14)

Merkittävä kutistumiseen vaikuttava ulkoinen tekijä betonirakenteilla on betonirakenteen kuivumiseen vaikuttava muoto ja dimensiot. Betonirakenteen paksuus vaikuttaa kuivumisnopeuteen. Pienet tai ohuet kappaleet kuivuvat suuria betonirakenteita nopeammin. Tälle tekijälle on määritetty termi muunnettu paksuus, joka tarkoittaa betonin poikkileikkauksen pinta-alaa jaettuna piirin puolikkaalla. Muunnettu paksuus esiintyy parametrina useissa kuivumiskutistuman laskukaavoissa. (14)

Tutkimuksen kannalta oleellinen ulkoinen tekijä on betonirakenteen eli pintalattian kuivuminen vain yläpinnastaan. Tällöin kuivuminen ja siitä aiheutuvat jännitykset jakautuvat betonipoikkileikkaukseen epätasaisesti. Pintavalun yläpinnan vetojännitys on alapintaa suurempi, jolloin rakenne pyrkii käyristymään, jolloin lattianurkat voivat irrota alustastaan ja kohota. Ulokkeina toimivien nurkkien kuormitus lisää halkeiluriskiä näillä alueilla. (14)

Betonin jälkihoito ja valuolosuhteet vaikuttavat myös lattian onnistumiseen. Riittävä tärytys, betonin laadunvalvonta, sekä hyvä ja riittävän pitkäkestoinen jälkihoito vaikuttava merkittävästi kutistuman suuruuteen. Työmaan laiminlyönnit tai virheet voivat vaikuttaa merkittävästi pintalattian kutistumaan. (14)

4.2.2 Sisäiset tekijät

Betonin kuivumiskutistumaan vaikuttavat sisäiset tekijät ovat perusedellytys kutistuman hallinnassa. Sisäiset tekijät käsittävät betonin komponentit, suhteituksen sekä mahdolliset lisäaineet. Lähde (14) listaa sisäiset tekijät seuraavasti: sementti, runkoaine, pastamäärä, vesi-sementtisuhte, lisäaineet, huokostimet, kutistumaa vähentävät lisäaineet, sekä erikoismenetelmät.

Betonissa tapahtuva kutistuminen on sementtipastan ominaisuus. Sementtipastan määrä vaikuttaa voimakkaasti betonin kutistuman suuruuteen. Mitä suurempi pastan suhteellinen osuus betonissa on, sitä enemmän betoni kutistuu. Runkoaineen vaikutus kutistumaan taas on päinvastainen, eli mitä enemmän runkoainesta betonissa on, sitä vähemmän betoni kutistuu. (14)

Runkoaineen maksimiraekoko vaikuttaa kutistuman suuruuteen välillisesti, sillä mitä suurempi maksimiraekoko ja mitä karkeampi runkoaineen jakauma betonissa on, sitä vähemmän sementtiä tarvitaan hyvän työstettävyyden säilyttämiseksi. Kiviaineksen määrän liiallinen kasvattaminen voi johtaa pumpattavuuden heikkenemiseen, joka tulee huomioida maksimiraekoon valinnassa sekä runkoaineen määrässä. USA:ssa ongelmaa on helpotettu korvaamalla sementtiä hienojakoisella kiviaineella. Hienojakoinen kiviaines vaikuttaa betonin rakeisuuteen, muokattavuuteen sekä lujuuteen. Hienojakoisen kiviaineen käyttö mahdollistaa pienemmän vesimäärän, jonka lisäksi notkistimen tarve vähenee. Kiviaineen raekoko vaihtelee sementin raekoosta lähelle 0,125 mm raekokoa. (14)

Runkoaineen ja pastamäärän keskinäisen suhteen lisäksi myös pastan vesi-sementtisuhte vaikuttaa kutistuman suuruuteen. Vesimäärän lisääntyessä myös kuivumiskutistuma kas-

vaa. Vesi-sementtisuhde määräytyy runkoaineen perusteella halutun notkeuden mukaan. Runkoaineen tulee olla kauttaaltaan sementin ympäröimää, jolloin runkoaineen pinta-ala vaikuttaa tarvittavan sementin määrään. Mitä isompi betonin maksimiraekoko on, sitä pienempi runkoaineen pinta-ala on suhteessa runkoaineen määrään. (14)

Betonin vesimäärä vaikuttaa kaikilla sementtimäärillä betonin kutistuman suuruuteen. Vesimäärän minimoinnilla ja runkoaineen määrän maksimoinnilla kutistumaa voidaan rajoittaa tehokkaimmin. Työmailla tehtävä betonin pumppaus rajoittaa betonin koostumusta, sillä betonin tulee olla riittävän notkeaa hyvän pumpattavuuden aikaansaamiseksi. Käytännössä siis pumpattavuus asettaa minimivaatimuksen vesimäärälle. Tästä syystä lattiabetonien vesipitoisuus ja notkeus ovat aina suurempia kuin mitä työmenetelmät muutoin edellyttävät. (14)

Sisäisiin tekijöihin lasketaan myös betonin lisäaineet, kuten notkistimet ja kutistumaa vähentävät lisäaineet. Erilaisten tehonotkistinten vaikutukset kutistumaan ovat epäselviä, sillä niiden aikaansaama betonin tiiveyden kasvu kasvattaa kutistumaa, kun taas vesimäärän vähennys vähentää kutistumaa. Kutistumaa vähentäviin lisäaineisiin eli SRA-aineisiin paneudutaan seuraavissa luvuissa. (14)

4.3 Kutistumishalkeilun hallinta ja betonin ominaisuudet

Betonilattian halkeilun hallinta voidaan jakaa halkeilun ennaltaehkäisemiseen sekä syntyneiden halkeamien hallintaan. Kutistumishalkeilua hallitaan raudoituksella. Raudoitus voi olla perinteinen verkko- tai tankoraidoitus tai lattia voi olla raudoitettu kuiduilla. Raudoituksella ei kuitenkaan voida estää halkeamien syntymistä, sillä raudoituksen toiminta alkaa vasta halkeaman synnyttyä. (4)

Halkeilua voidaan ennaltaehkäistä oikeanlaisella betonilaadulla, jälkihoidolla sekä betonin lisäaineilla. Betonin suhteituksella ja betonilaadulla on vaikutusta betonin kutistuman suuruuteen, jonka lisäksi betonin lujuus vaikuttaa halkeamien tiheyteen. Sekä halkeilun syntymiseen. (4, 12)

Jälkihoidolla ja lisäaineilla voidaan puolestaan vaikuttaa kutistuman alkamisajankohtaan ja siirtää kutistuman kehittymistä myöhemmäksi. Betonin valun jälkeen betonin lujuudenkehitys sekä kutistuma ja sen aiheuttama vetojännitys kilpailevat rakenteessa. Mitä myöhemmin betoni altistuu vetojännitykselle, sitä suuremmaksi betonin lujuus on ehtinyt kasvaa ja sitä paremmin betoni vastustaa halkeilua. Mikäli estetystä kutistumasta aiheutuvat vetojännitykset eivät ylitä betonin vetolujuutta missään vaiheessa, ei halkeamia synny. Betoniin jäävät jännitykset pienenevät viruman vaikutuksesta ajan mittaan. (12)

Betonin kutistumishalkeiluun vaikuttavia tekijöitä on lukuisia ja niiden arviointi luotettavasti on vaikeaa. Halkeilun hallinnassa onnistutaan parhaiten, kun kaikki halkeiluun vaikuttavat tekijät pyritään huomioimaan.

4.3.1 Betonin vetolujuuden kehittyminen

Betonin hydrataatio alkaa valun jälkeen. Hydrataatiossa betonin sementti sitoutuu kemiallisesti, jonka seurauksena betoni kovettuu. Betonin lujuus kehittyy betonin kovettumisen seurauksena. Lujuuden kehittymisen nopeuteen vaikuttaa betonin suhteitus, mahdolliset lisäaineet sekä betonin lämpötila kovettumisen aikana.

Eurokoodin mukaiset lujuusluokat ilmaisevat betonin ominaisuudet 28 vuorokauden iässä. Tutkimuksen kannalta betonin lopullisen vetolujuuden lisäksi kiinnostavaa on betonin vetolujuuden kehittyminen valuhetkestä eteenpäin. Eurokoodissa SFS-EN 1992-1-1 esitetään laskukaava 3 betonin lujuuden arvioimiseksi alle 28 vuorokauden iässä. (15)

$$f_{ctm}(t) = (\beta_{cc}(t))^{\alpha} \cdot f_{ctm} \quad (3)$$

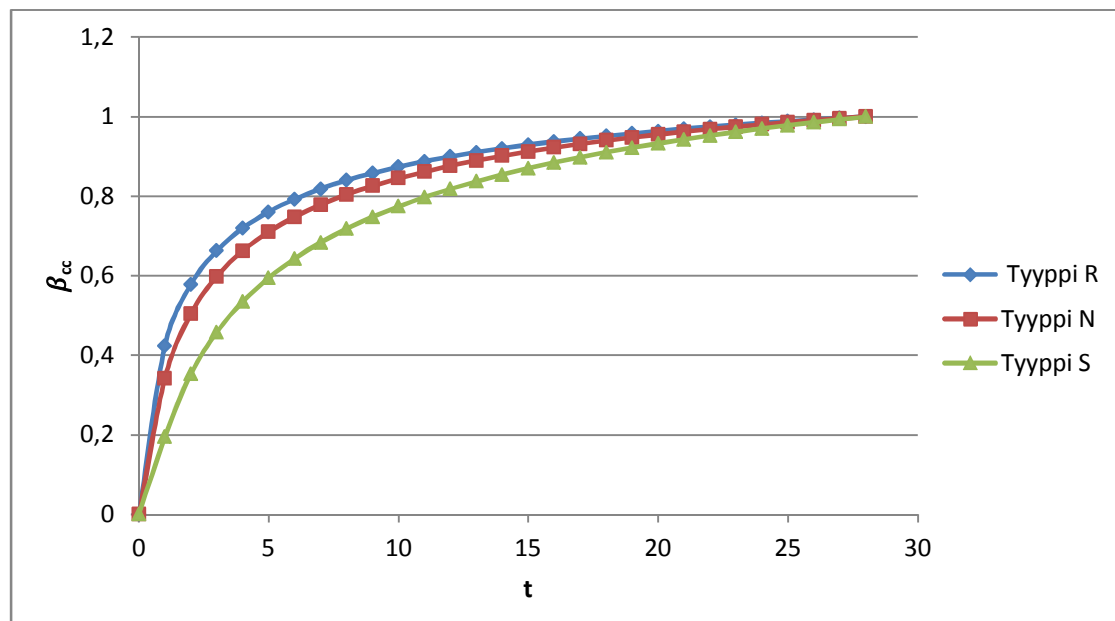
Missä:

t on aika vuorokausina
 α on 1 kun $t < 28$
 f_{ctm} on betonin nimellisetvetolujuus
 $\beta_{cc}(t) = e^{s \cdot (1 - (\frac{28}{t})^{0.5})}$

Missä:

s on sementin tyypistä riippuva kerroin
 = 0,20 (tyyppi R)
 = 0,25 (tyyppi N)
 = 0,38 (tyyppi S)

Kerroin $\beta_{cc}(t)$ siis kuvastaa lujuuden suhteellista kehitystä. Kuvassa 4.4 on kuvattu kertoimen β_{cc} suuruus ajan suhteen Eurokoodin eri sementtityypeille R, N ja S esittämällä kertoimilla. Mitä suurempi kerroin s on, sitä nopeampaa lujuudenkehitys on.



Kuva 4.4 Betonin lujuuden kehitys ajan funktiona. (15)

Eurokoodin mukainen laskukaava vetolujuuden kehittymiseksi on karkea approksimaatio. Jälkihoito- ja kuivumisolosuhteet sekä rakenteen mitat vaikuttavat suuresti betonin vetolujuuden kehittymiseen. Betonin puristuslujuuden laskentakaava on eurokoodissa käytännössä sama, kuin vetolujuuden kaava. Betonin vetolujuus ja puristuslujuus kehittyvät suhteellisesti kutakuinkin samaa tahtia. (15)

4.3.2 Betonin viruma

Betonin viruminen tarkoittaa betonissa vallitsevan jännitystilän aiheuttamaa betonin plastista muodonmuutosta.(12) Viruma on betonirakenteissa yleensä haitallinen ilmiö, mutta joissakin tapauksissa se voi vähentää jännityksiä ja halkeilua.(13) Alustaansa kiinnitettyjen betonilattioiden tapauksessa vetoviruman seurauksena estetyn kutistuman aiheuttama vetojännitys betonissa pienenee. Vetoviruma on merkittävä tekijä betonilattioiden halkeamien vähentämisessä. Tämä edellyttää, ettei betonin kutistumasta aiheutunut vetojännitys ylitä betonin vetojännitystä. (12, 16)

Betonin viruminen huomioidaan myös Eurokoodissa ja sen tunnus on ε_{cc} . Eurokoodissa virumiseen vaikuttaviksi tekijöiksi listataan ympäristön kosteus, rakenneosan, betonin koostumus sekä betonin kovettumisaste kuormituksen alkaessa. Virumisen suuruus riippuu kuormituksen kestosta ja suuruudesta. (15)

Virumasta aiheutuvaa muodonmuutosta arvioidaan virumaluvun φ avulla. Virumaluku on suhdeluku, jolla kimmoinen muodonmuutos kerrotaan, jotta saadaan viruman aiheuttama muodonmuutos. (13) Virumaluvun määrittämiseen on menetelmä standardissa SFS-EN 1992-1-1. Virumaluvun määrittämiseen vaikuttaa suhteellinen kosteus, betonin lujuus sekä kuormituksen alkamisajankohta. (15)

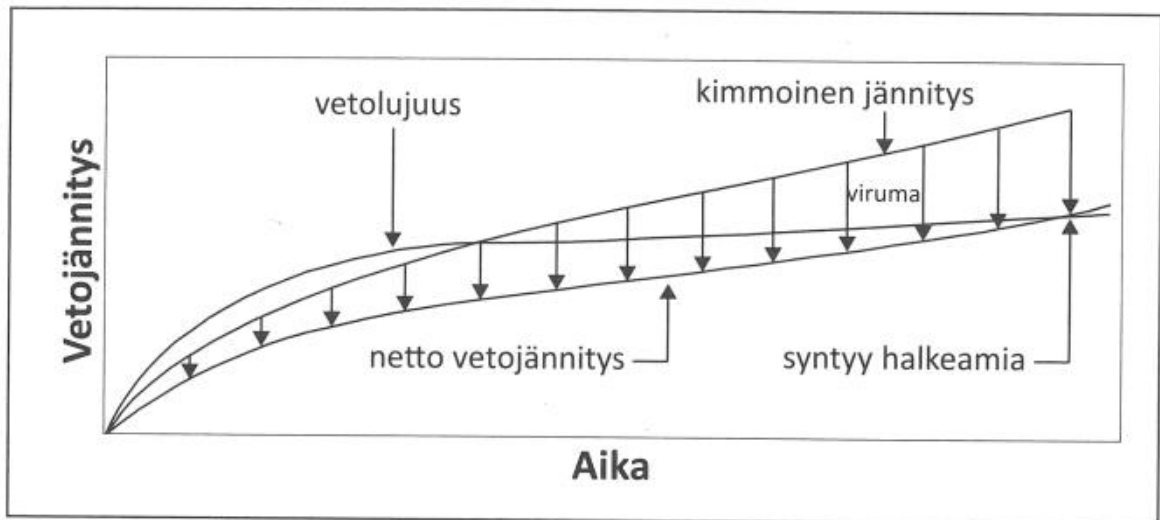
Aikavälillä t_0 - t tapahtuma viruma voidaan laskea kaavasta 4:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c} \varphi(t, t_0) \quad (4)$$

Missä:

t_0	on betonin ikä kuormittamishetkellä
t	on ajankohta, jolla viruma lasketaan
$\sigma_c(t_0)$	on betonin jännitys ajanhetkellä t
E_c	on tangenttimoduuli 28 vuorokauden iässä
$\varphi(t, t_0)$	on virumaluku aikavälille $t-t_0$ (13)

Edellä mainittu menetelmä sopii puristusjännityksestä seuraavalle viruman aiheuttamalle muodonmuutokselle, eikä vetojännityksille ole toistaiseksi vastaavaa menettelyä, joskin vetoviruma tunnetusti vähentää kutistuman aiheuttamia halkeamia. Kuvassa 4.5 on esitetty vetolujuuden ja vetojännityksen kehittyminen sekä viruman vaikutus periaatetasolla (13)



Kuva 4.5 Betonin viruman vaikutus kimmoiseen jännitykseen suhteessa vetolujuuden kehittymiseen. (13)

Viruman vaikutusta estetyn kutistuman aiheuttamaan halkeiluun on tutkittu ulkomaalaisessa tutkimuksessa. Tutkimuksessa valettiin vähintään 9kk ikäisiin betonipalkkeihin 40mm pintavalu. Koekappaleissa tutkittiin myös tartunnan vaikutusta valmistelemalla valun vastainen pinta eri koekappaleiden välillä eri tavoin. Pintavalut suoritettiin sileälle, hiekkapuhalletulle ja muotoillulle betonipinnalle. Tutkimuksessa käytettiin kahta eri suhteitusta, joilla päästiin toisistaan poikkeaviin kutistumiin. (17)

Taulukko 4.1 Viruman vaikutuksen tutkimuksessa käytetyt betonit (17)

Substrate and overlay mix proportions and material properties

		Substrate	Overlay 1	Overlay 2
Cement CEM I	[kg/m ³]	350	640	510
Water	[kg/m ³]	175	300	235
19 mm Greywacke	[kg/m ³]	1025	–	–
9 mm Greywacke	[kg/m ³]	–	–	940
Sand, max. 2 mm	[kg/m ³]	875	1300	660
W/C ratio	[–]	0.50	0.47	0.46
Slump	[mm]	90	Collapse	80
28-d compr. strength	[MPa]	48.4	50.9	53.3
28-d tensile split strength	[MPa]		2.1	3.0
28-d elastic modulus	[GPa]	28.1	22.1	29.6
28-d ϵ_{FSS}	[10 ⁻⁶]		540	290

Kuvassa 4.1 on nähtävillä alustana toimivan palkin (substrate) sekä kahden eri pintabetonin (overlay 1, 2) ominaisuudet. Oleellisina eroina ovat vetolujuus, joka toisessa koekappaleessa oli 2,1 MPa ja toisessa 3,0 MPa sekä kutistuma, joka toisessa koekappaleessa oli 0,54 % ja toisessa koekappaleessa 0,29 %. Kutistuman suuruudet mitattiin vapaasti kutistuvista koekappaleista.

Enemmän kutistuva betoni halkeili tutkimuksessa kaikissa koekappaleissa eikä halkeamaväleissä ollut juurikaan eroja erilaisten tartuntaominaisuuksien omaavissa koekappaleissa. Tartuntaa tutkittiin halkeilleessa betonissa ja sen havaittiin olevan hyvä myös halkeamien ympäristössä. Vähemmän kutistuvalla, mutta korkeamman vetolujuuden omaaval-

la betonilla tartunta petti koekappaleessa, jossa alustan ja pintalattian pinta oli sileä. Muissa koekappaleissa tartunta säilyi hyvänä, eikä halkeilua esiintynyt ollenkaan. Tästä voidaan päätellä, että halkeilemattomuuden taustalla on vetoviruman aiheuttama vetojännitysten aleneminen. (17)

Viruman vaikutusta halkeilun vähentämiseksi on tutkittu myös muuten ja se on tunnistettu ominaisuus, jonka on havaittu vähentävän estetyn kutistuman aiheuttamia vetojännityksiä jopa 50 %. (16, 17) Viruman vaikutus halkeiluun vaatii kuitenkin jatkotutkimuksia esimerkiksi käytännön pintalattia-abetoneiden osalta.

4.3.3 Betonin kutistumaa vähentävät lisäaineet (SRA)

Kutistumaa vähentävät lisäaineet eli SRA-aineet (shrinkage reducing admixtures) ovat tavanomaisesti glykoli- tai propyleeniglykolipohjaisia vesiliukoisia betonin lisäaineita. (18) SRA-aineita on käytetty Yhdysvalloissa ja Japanissa 1980-luvulta alkaen, jossa aineet ovat suuressa suosiossa. Suomessa SRA-lisäaineita alettiin käyttää vasta 2000-luvulla ja niiden käyttö on ollut rajallista lisäaineiden korkean hinnan ja vähäisen tutkimusaineiston vuoksi. (19)

SRA-lisäaineiden toiminta perustuu ensisijaisesti kapillaarihuokosissa olevan veden pintajännityksen alentamiseen, mikä alentaa kuivumiskutistuman aiheuttamia voimia. (18) Kun vesi haihtuu betonin kapillaarihuokosista, syntyy huokosiin kapillaaripainetta. Kapillaarihuokosten halkaisija on verrannollinen kapillaaripaineeseen nähden. Kasvava paine vetää kapillaarihuokosia kasaan, jolloin niiden tilavuus pienenee ja betoni kutistuu. SRA-aineilla voidaan alentaa veden pintajännitystä, jolloin kapillaaripaine alenee ja betoni kutistuu vähemmän. (14)

Toinen kutistumaa rajoittava vaikutus SRA-aineilla johtuu niiden seurauksena aiheutuneesta hienommasta huokosrakenteesta betonissa. Tämä vaikuttaa betonin sisäiseen suhteelliseen kosteuteen ja betonin sitoutumiskutistumaan. (14)

SRA-aineita annostellaan 0,5-3 % sementin painosta ja tehokkain annostus on havaittu olevan välillä 1,5-2 %. Tällöin vaikutukset betonin muihin ominaisuuksiin eivät ole merkittäviä. SRA-aineet eivät vähennä betonista haihtuvan veden määrää, mutta ne hidastavat veden poistumista betonista. Tämä puolestaan vaikuttaa kuivumiskutistuman kehittymisnopeuteen. (14)

Kuivumiskutistuman lopullinen suuruus voi vähentyä 25-50 % eli kutistumaa ei voida SRA-aineilla täysin poistaa. (18) Vaikka SRA-aineilla ei voitaisikaan vaikuttaa lopullisen kutistuman suuruuteen, voidaan niillä ainakin siirtää tai hidastaa kuivumiskutistuman kehittymistä, jolloin viruman edulliset vaikutukset tulevat paremmin esiin.

4.4 Kutistumiseen vaikuttavat tekijät pintabetonilattioissa

Tutkimuksen kohteena olevat pintalattiat aiheuttavat omat reunaehdonsa betonin kutistumaan vaikuttaviin ulkoisiin tekijöihin. Pintalattioissa betonin paksuus suhteessa muihin dimensioihin on pieni ja betoni valetaan kiinni olemassa olevaan rakenteeseen. Pintabeto-

nilattia valetaan tavallisesti ontelolaataston päälle tasaisen lattiapinnan aikaansaamiseksi. Sekä ontelolaattojen ominaisuudet, että kantavan rungon muodonmuutokset kuormituksesta vaikuttavat pintalattioihin.

4.4.1 Ontelolaattavälipohjan vaikutus pintabetonilattiaan

Ontelolaatat ovat betonielementtejä joiden taivutus- ja momenttikapasiteettia on lisätty esijännityksellä. Ontelolaatat esijännitetään epäsymmetrisesti alapinnastaan, mikä aiheuttaa ontelolaatoille alkukaarevuutta eli taipumaa ylöspäin. Tämä taipuman suuruus riippuu ontelolaattaelementin paksuudesta, pituudesta sekä jännevoimista. Karkeasti mitä pidempi jänneväli, sitä suurempi on ontelolaatan taipuma jännevälin keskellä. Ontelolaatan esijännityksestä aiheutuma taipuma tasosta ylöspäin on tavanomaisesti muutamia kymmeniä millimetrejä, mutta erityisen pitkissä ontelolaatoissa taipuma voi olla jopa 100mm.

Pintalattian paksuutta suunnitellessa tulee ontelolaattatasojen epätasaisuus ottaa huomioon. Tästä seuraa se, että pintalattian paksuus vaihtelee tason jännevälin ja tukialueiden välillä. Raudoittamattoman pintalattian ohjepaksuus on 40-50 mm.(4) Pintavalun paksuus voi vaihdella jopa useita kymmeniä millimetrejä, jolloin paksuuden muutos kasvaa prosentuaalisesti suureksi. Paksuuden vaihtelu vaikuttaa betonin kuivumisnopeuteen, jolloin kutistuma kehittyy laatan eri alueilla vastaavasti eri nopeudella.

4.4.2 Kantavan rakenteen päälle valaminen

Pintabetonilattia valetaan kiinni olemassa olevaan betonirakenteeseen tavanomaisesti ontelolaattatason päälle. Tämä vaikuttaa betonin kuivumiseen, sillä kosteus poistuu eri nopeudella pintavalun yläpinnasta ilmaan ja alapinnasta kovettuneeseen betoniin. Pintalattian betoni voi kuivua yläpinnastaan alapintaa nopeammin, mikä voi vaikuttaa kutistumishalkeiluun. Tähän olosuhteeseen ei kuitenkaan voida vaikuttaa.

Pintalattian jännityksiin ja muodonmuutoksiin vaikuttaa myös kantavan rakenteen taipuma. Tutkimuksessa käsitellään pääasiassa ontelolaattatason päälle valettuja pintalattioita, mutta vastaava ilmiö esiintyy myös muilla rakenteilla, joissa kuormitus aiheuttaa taipumia. Ontelolaatta toimii välipohjarakenteessa yksiaukkoisena palkkina. Mikäli pintabetoni valetaan jatkuvana usean jännevälin ylitse, toimii pintavalu tukien yli moniaukkoisena palkkina. Tällöin pintavaluun kohdistuu myöhemmin rakennetta kuormittaessa vetoa ontelolaataston palkkilinjoille. Ontelolaatta taipuu kuormituksesta alaspäin, jolloin yläpinnan puristusjännitys kasvaa. Tällöin myös ontelolaatan pinnalla olevan pintavalun puristusjännitys kasvaa. Vastaavasti pintavalun ollessa jatkuva tukialueiden yli, syntyy pintavalulle moniaukkoisen palkin tavoin yläpinnan vetoa tukialueiden negatiivisista momenteista. Pintalattia tuleekin käytännössä raudoittaa tukien ylitse vetojännityksen takia.

Kentässä kuormituksesta aiheutuva yläpinnan puristusjännityksen kasvaminen rakenteen kuormittuessa kompensoi estetyn kutistuman aiheuttamaa vetojännitystä, jolloin tilanne on edullisempi, kuin taipumattomalla rakenteella. Vastaavasti yläpinnalle syntyvä veto tukialueilla lisää pintalattian vetojännityksiä. Kyseiset tapaukset rajataan tutkimuksen ulkopuolelle.

4.4.3 Pinalattian pinnan ja pohjan kutistumaero

Pintabetonilattioissa betoni kuivuu pääasiassa yläpinnan kautta, sillä kosteuden haihtuminen ympäröivään ilmaan on nopeampaa, kuin kosteuden siirtyminen kovettuneeseen betonialustaan. Tämän seurauksena betonilattian pinta kuivuu pohjaosaa nopeammin, mistä seuraa kutistumaero ylä- ja alapintojen välille. Ylä- ja alapintojen välinen kutistumaero aiheuttaa betonilattian yläpintaan alapintaa suuremman vetojännityksen, josta seuraa betonilattioille tyypillistä käyritystä. Käyristyminen betonilattiassa näkyy tavallisimmin lattian nurkkien ja reunojen nousua. (20)

Kiinnitetyissä pinalattioissa pinalattian käyritymä pyrkii irrottamaan pinalattian alustastaan. Mikäli pinalattian ja alustan tartunta on huono, voi pinalattian nurkat irrota alustastaan. Irronneilla alueilla pinalattia murtuu helposti kuormituksessa. (20) Kokonaiskutistumaan pinnan nopeammalla kuivumisella ei ole vaikutusta.

4.5 Kutistuman suuruuden laskennallinen arviointi

Betonin kuivumiskutistuman suuruuden arviointiin on useita laskentakaavoja, jotka huomioivat eri tekijöitä vaihtelevasti. Suomen rakentamismääräyskokoelmassa sekä Eurokoodissa esitetyt laskentakaavat poikkeavat toisistaan. Eurokoodissa kuivumiskutistuman laskukaavassa huomioidaan betonin puristuslujuus, sementin tyyppi sekä poikkileikkauksen muunnettu paksuus. Eurokoodin laskentamenetelmä mahdollistaa kutistumisen suuruuden arvioinnin tietyllä aikavälillä. (15) Suomen rakentamismääräyskokoelmassa kutistumisen laskentamenetelmä on Eurokoodia yksinkertaistetumpi ja perustuu käytännössä taulukoi-tuihin kertoimiin, jotka sijoitetaan kaavaan. Myös rakentamismääräyskokoelman laskukaavoilla on mahdollista tarkastella kutistumaa tietyllä aikavälillä. (21)

Kumpikin menetelmä on riittävän tarkka tavanomaiseen suunnitteluun, sillä laskukaavat antavat vähintäänkin viitettä kutistuman suuruusluokasta. Estetyn kutistuman tapauksessa kutistuman suuruus on pääasiallinen halkeilua aiheuttava tekijä ja käytetyn betonilaadun kutistuman suuruus tulee tietää mahdollisimman tarkasti, mikäli halkeilun minimointi ja hallinta on tavoitteena.

4.5.1 Kutistuman laskenta Eurokoodin mukaan

Eurokoodissa kokonaiskutistumalle annetaan laskukaava 5:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (5)$$

missä:

ε_{cs}	on kokonaiskutistuma
ε_{cd}	on kuivumiskutistuma
ε_{ca}	on sisäinen kutistuma

Kuivumiskutistuman loppuarvot $\varepsilon_{cd,\infty}$ on esitetty taulukossa 4.2 keskiarvojen odotusarvoina, joiden keskihajonta on noin 30 %.

Taulukko 4.2 Taulukko kuivumiskutistuman arvoille. (15)

Nimellisen kuivumiskutistuman arvoja $\epsilon_{cd,0}$ (‰) betonille, jonka sementti on CEM-tyyppiä N						
$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (MPa)	Suhteellinen kosteus (%)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0,00
40/50	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0,00
60/75	0,38	0,36	0,30	0,19	0,10	0,00
80/95	0,30	0,28	0,24	0,15	0,08	0,00
90/105	0,27	0,25	0,21	0,13	0,07	0,00

Vastaavasti kuivumiskutistuman kehittyminen ajan mukana saadaan kaavasta 6 ja 7:

$$\epsilon_{cs}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) * k_h * \epsilon_{cd,0} \quad (6)$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t-t_s)}{(t-t_s)+0,04\sqrt{h_0^3}} \quad (7)$$

missä

k_h on kerroin, joka riippuu muunnetusta paksuudesta h_0
 t on betonin ikä vuorokausina tarkasteluhetkellä
 t_s on betonin ikä vuorokausina kuivumiskutistumisen alkamishetkellä, tavanomaisesti jälkihoidon päättymishetki.
 h_0 on poikkileikkauksen muunnettu paksuus (mm)
 $=2A_c/u$

missä

A_c on betonin poikkileikkausala
 u on kuivumiselle alttiin poikkileikkauksen osan piiri
 $\epsilon_{cd,0}$ määritellään alla

Eurokoodissa on esitetty kuivumiskutistuman määrittämisen perusyhtälöt 8 ja 9:

$$\epsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 * \alpha_{ds1}) * e^{(-\alpha_{ds2} * \frac{f_{cm}}{f_{cm0}})} \right] * 10^{-6} * \beta_{RH} \quad (8)$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \quad (9)$$

missä:

f_{cm} on keskimääräinen puristuslujuus (MPa)
 f_{cm0} = 10 MPa
 α_{ds1} on kerroin, joka riippuu sementin tyypistä
= 3, kun sementti on S-tyyppiä
= 4, kun sementti on N-tyyppiä
= 6, kun sementti on R-tyyppiä
 α_{ds2} on kerroin, joka riippuu sementin tyypistä
= 0,13, kun sementti on S-tyyppiä
= 0,12, kun sementti on N-tyyppiä
= 0,11, kun sementti on R-tyyppiä

RH on ympäristön suhteellinen kosteus (%)
 RH₀ = 100 %

Sisäinen kutistuma lasketaan kaavasta 10:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) * \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (10)$$

Missä (kaavat 11 ja 12):

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10) * 10^{-6} \quad (11)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(-0,2t^{0,5})} \quad (12)$$

4.5.2 Kutistuman laskenta SRMK

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa kutistuman laskennalle on Eurokoodia yksinkertaisempi menetelmä, joka perustuu enimmäkseen taulukoituihin kertoimiin. (21)

Loppukutistuman laskentakaava 13:

$$\varepsilon_{cs} = k_{sh} * \varepsilon_{cs0} \quad (13)$$

Missä:

- ε_{cs0} on betonin loppukutistuman perusarvo, jolle rakenteen eri ympäristöolosuhteissa otaksutaan taulukon 2.3 mukaiset arvot
- k_{sh} on rakenteen muunnetusta paksuudesta h_e riippuva kerroin, joka saadaan taulukosta 2.4. Muunnettu paksuus lasketaan siten, että poikkileikkauksen pinta-ala jaetaan sen piirin puolikkaalla.

Taulukko 4.3 Loppukutistuman perusarvot sekä kertoimet h_c sekä k_{sh} . SRMK taulukot 2.3 ja 2.4 (21)

TAULUKKO 2.3

Loppukutistuman perusarvo ϵ_{cs0}

Rakenteen ympäristö- olosuhteet	Suhteellinen kosteus %	ϵ_{cs0} ‰
Vesi	100	0
Hyvin kostea ilma	90	0,2
Ulkoilma	70	0,4
Kuiva ilma	40	0,6

TAULUKKO 2.4 Kerroin k_{sh}

h_c (mm)	k_{sh}
≤ 50	1,20
100	1,00
200	0,80
300	0,65
≥ 500	0,50

Aikaväillä t_i - t_n tapahtuva kutistuma voidaan laskea kaavasta 14:

$$(k_{sn} - k_{si}) * \epsilon_{cs} \quad (14)$$

missä kertoimet k_s valitaan taulukosta 4.4

Taulukko 4.4 Kertoimet k_s ja k_c . SRMK taulukko 2.5 (21)

TAULUKKO 2.5 Kertoimet k_s ja k_c

Aika	k_s	k_c
1d	0,10	0,2
3d	0,15	0,25
28d		0,4
0,5a		0,7
1a		0,85
$\geq 5a$		1,0

5 Matemaattinen malli kutistumishalkeilulle

Pintabetonin halkeilu johtuu estetystä kutistumasta. Kantavan betonirakenteen päälle valettava pintabetoni pyrkii kuivuessaan kutistumaan. Tartunta pintabetonin ja kantavan rakenteen välillä rajoittaa kutistumaa, jolloin pintabetoniin syntyy vetojännityksiä. Halkeamia syntyy betonin vetojännityksen ylittäessä betonin vetolujuuden. Matemaattisen mallin on tarkoitus kuvata halkeamanleveyttä eri muuttujien suhteen. Näitä muuttujia ovat kokonaiskutistuman suuruus, tartunta alustaan sekä kuitubetonin jäännösvetolujuus. Tutkimuksessa perehdytään kirjallisuuslähteistä löytyviin laskukaavoihin sekä tutkitaan halkeilua itse johdettuna ja verrataan tulosta kirjallisuuslähteiden tuloksiin.

Saumattoman kuitubetonilattian tapauksessa halkeilun hallinta perustuu korkeaan tartuntalujuuteen pinalattian ja alustan välillä, milloin vetolujuus ylitetään jo pienellä matkalla ja halkeamien määrä kasvaa. Kokonaiskutistuma säilyy samana, jolloin halkeamien leveys pienenee. Korkea kitka alustan välillä on tärkeää halkeamien hallinnassa, kun käytössä on saumaton lattia. (11)

5.1 Halkeamaleveys ja halkeamaväli kirjallisuudessa

Pinalattian halkeamaleveyttä ja halkeamien keskinäistä etäisyyttä eli halkeamavälin suuruutta ei käsitellä Eurokoodeissa. Halkeamaleveyden ja halkeamavälin laskentaan on esitetty laskukaava Betoni 2/2015 – lehdessä. Myös 2018 julkaistussa Suomen Betoniyhdistyksen julkaisussa By 66, Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje 2018 on esitetty laskentamenetelmä estetyn muodonmuutoksen aiheuttaman vetojännityksen aikaansaamille halkeamaleveyksille. (9) Esitetyt laskukaavat ovat laadittu teräskuitubetonille, sillä teräskuitubetonin käyttö on ollut lähihistoriassa huomattavasti polymeerikuitubetonin käyttöä yleisempää. Laskukaavat itsessään toimivat kuitenkin myös polymeeri- tai muilla synteettisillä kuiduilla vahvistetulle betonille.

Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohjeen laskukaavassa esiintyy muuttujana betonin kimmomoduuli. Betoni-lehden laskukaavassa ei suoraan esiinny betonin kimmomoduulia, mutta tutkimuksen kohteena olevien pinalattioiden tapauksessa. Kimmomoduulille on esitetty lähteessä (15) seuraava laskukaava 15:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (15)$$

Taulukossa 5.1 listattuna lujuusluokittain kimmomoduulin arvot ovat seuraavat:

Taulukko 5.1 Kimmomoduulit lujuusluokittain. (15)

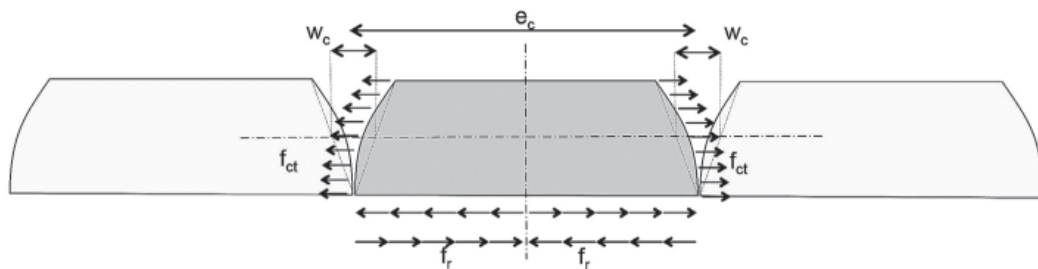
Betonin lujuusluokka:	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45
E_{cm} (GPa):	30	31	33	34

Taulukkoon ei ole listattu kaikkia lujuusluokkia, sillä korkean lujuusluokan betonia ei tavanomaisesti käytetä pinalattioissa sen suuren kutistuman takia.

5.1.1 Jürgen Mandl:n laskentamenetelmä

Jürgen Mandl:n laatima laskentamenetelmä esittää halkeamavälin ja halkeamaleveyden laskukaavat. Laskukaavojen tueksi on annettu vapaakappalekuvaajan kaltainen kuva, josta laskennan lähtökohdat käyvät ilmi. Laskentamenetelmä on esitetty Suomessa Betoni-lehdessä osana Mandl:n kirjoittamaa artikkelia. (22)

Mandl:ia haastateltiin tutkimusta varten puhelinhaastattelussa. Hän sanoi, että laskentamenetelmän luomiselle oli tarve, sillä kuitubetonisuunnittelu oli ja on edelleenkin suhteellisen sattumanvaraista. Laskukaava perustuu yksinkertaiseen staattiseen malliin ja on tarkoitettu yksinkertaiseksi työkaluksi halkeilun mitoittamiseen kuitubetonilattioille. Laskukaava on tieteellinen, mutta se korreloi havaintojen perusteella hyvin halkeilun suhteen käytännön tilanteissa. (22) Halkeamaleveys voidaan laskea kokonaiskutistuman ja halkeamavälin avulla. Halkeamavälin laskenta voidaan johtaa kuvan 5.1 pohjalta. (11)



Kuva 5.1 halkeamavälin laskentaan vaikuttavat voimasuureet. (11)

Kuvan 5.1 pohjalta halkeamaväli voidaan johtaa kaavoiksi 16, 17 ja 18 seuraavasti:

$$f_r \cdot b \cdot \frac{e_c}{2} = \Delta f_{ct} \cdot b \cdot h \quad (16)$$

$$\Delta f_{ct} = f_{ct} - f_{ct}^f \quad (17)$$

$$e_c = 2 \cdot \frac{\Delta f_{ct} \cdot h}{f_r} \quad (18)$$

missä:

f_r	on alustan lepokitkavoima
h	on betonin paksuus
b	on betonikappaleen leveys (ainoastaan yhtälön muodostuksessa)
f_{ct}	on betonin vetolujuus
f_{ct}^f	on kuitubetonin jäännösvetolujuus

Vastaavasti halkeamanleveydelle on esitetty laskukaava 19:

$$w_c = e_c \cdot \left[(\varepsilon_{cs}(t - t_0) - \varepsilon_T) - \frac{f_{ctd}^f}{E_{cm}} \right] \quad (19)$$

Missä:

ε_{cs}	on kokonaiskutistuma aikavälillä $t-t_0$
ε_T	on lämpömuodonmuutos
f_{ctd}^f	on betonin jäännösvetolujuus
E_{cm}	on betonin kimmomoduuli

Halkeamavälin tiheyttä kasvattamalla saadaan halkeamaleveyttä pienennettyä. Hyvällä tartunnalla alustan ja pintalattian välillä saadaan kasvatettua edellä mainitun laskukaavan lepokitkavoimaa. Betonin kimmomoduuli on riippuvainen betonin lujuusluokasta, joten betonin lujuusluokka vaikuttaa myös laskukaavasta saataviin tuloksiin. (15)

Halkeamavälin yhtälöstä nähdään, että laatan paksuuden kasvattaminen kasvattaa halkeamaväliä ja täten halkeamaleveyttä. Halkeamavälin kaavan nimittäjässä on myös betonin vetolujuuden sekä kuitubetonin erotus. Halkeamaleveyden ja halkeamavälin laskukaavassa on useita muuttujia, joista jokaisella voidaan vaikuttaa lopputilanteeseen. Alustan ja pintalattian välinen tartunta, betonin pieni kutistuma sekä kuiduilla saavutettava jäännösvetolujuus kaikki pienentävät halkeamien kokoa.

5.1.2 BY 66, Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje

Suomen Betoniyhdistyksen julkaisussa BY 66, Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje 2016 esitetään raudoittamattoman teräskuitubetonin halkeamaleveyden laskennalle laskukaava 20. (9)

$$w_{max} = R_{ax} \cdot \varepsilon_{cs} \cdot s_{r,max} - \frac{f_{ftd,R1}}{E_c} \cdot (1 + \varphi_{ef}) \cdot s_{r,max} \geq 0 \quad (20)$$

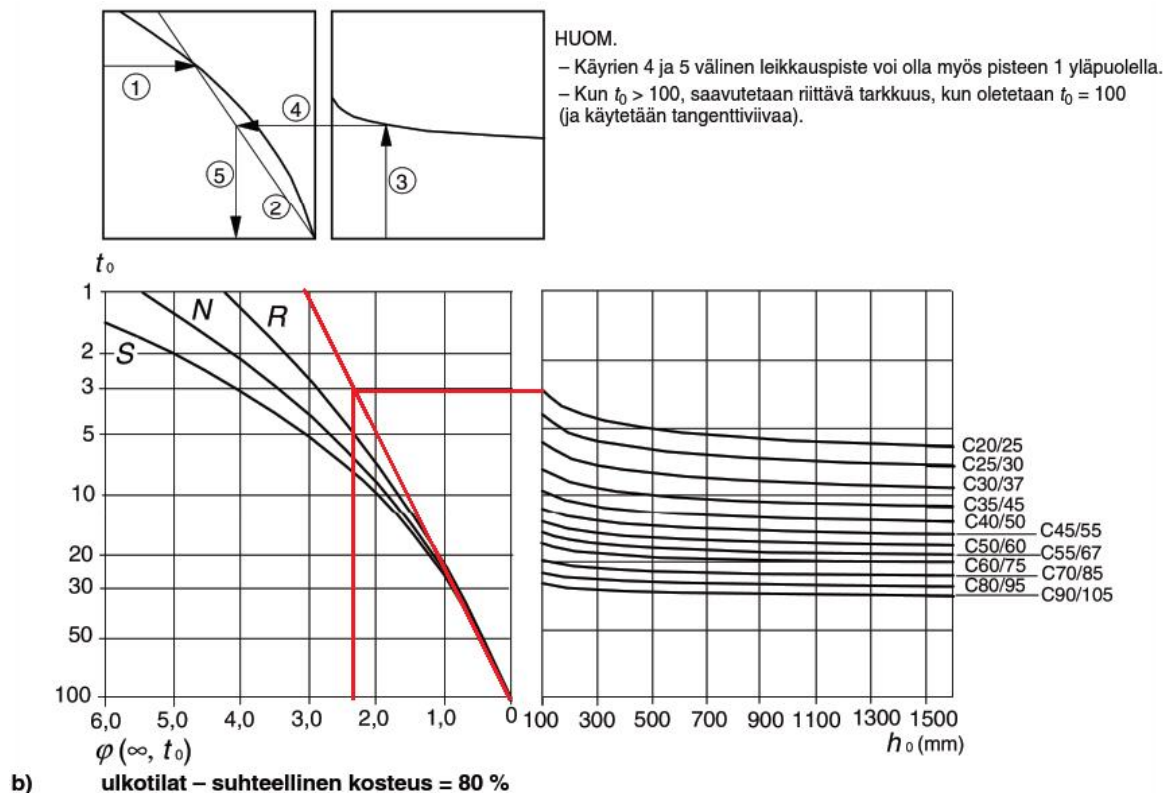
Missä:

ε_{cs}	on esimerkiksi kutistumaliikkeistä aiheutuva muodonmuutos
R_{ax}	($0 \leq R_{ax} \leq 1$) on aksiaalisen liikerajoituksen aste, jonka arvoja on annettu standardin SFS-EN 1992-3 liitteessä L. Arvon tulisi olla $\geq 0,5$
φ_{ef}	on virumisaste SFS-EN 1992-1-1 kohdan 5.8.4 mukaisesti
$s_{r,max}$	on halkeamaväli
$f_{ftd,R1}$	on kuitubetonin R1 luokan jäännösvetolujuuden mitoitusarvo
E_c	on betonin tangenttimoduuli $1,05 \cdot E_{cm}$

Yllä esitetty laskukaava käsittelee ainoastaan halkeamaleveyttä. Julkaisussa ei käsitellä halkeamaväliä estetyn kutistuman tapauksessa tai suoralle vedolle. (9) Halkeamaväli on kuitenkin parametri halkeamaleveyden laskukaavassa. Yllä esitettyä halkeamaleveyden laskukaavaa voidaan kuitenkin soveltaa, kun halkeamaväli asetetaan muuttujaksi. Voidaan

siis tarkastella halkeamaleveyksiä erisuuruksilla halkeamaväleillä ja verrata yllä olevan laskukaavan antamia tuloksia muiden halkeamaleveyden laskukaavojen tuloksiin.

Laskukaavan virumisaste viittaa standardin SFS-EN 1992-1-1 kohtaan 5.8.4, jossa tutkitaan pitkäaikaisviruman aiheuttamaa käyristymää. Koska poikkileikkauksessa ei esiinny momenttia, käytetään virumisasteena SFS-EN 1992-1-1 kohdan 3.1.4 mukaista virumalukua. Kutistumishalkeilu johtuu pääosin kuivumiskutistumasta, joten käytetään virumalukuna 30 vuorokauden mukaista virumalukua ja lasketaan virumaluku ulkotilojen suhteellisen kosteuden 80% RH mukaan N-tyyppin betonilla. Virumaluvuksi tulee karkea likiarvo, mutta sekä sisätilojen, että ulkotilojen mukaan laskettuna 20 vuorokauden jälkeen eri sementtityyppien kesken saadaan suhteellisen samankaltaisia tuloksia, joten suuruusluokka on oikein. Kuvaa 5.2 tarkastelemalla saadaan virumaluvun arvoksi karkeasti 2,3. Rakenteen paksuutena on käytetty 100mm paksuutta. Hieman pienemmät paksuudet johtaisivat käyriä extrapoloimalla hieman suurempiin virumaluvun arvoihin, mutta virumaluvun arvon pienen muutoksen vaikutus laskennan lopputulokseen on vähäinen.



Kuva 5.2 virumaluvun määrittäminen standardin SFS-EN 1992-1-1 mukaan kohdan 3.1.4 yksinkertaistetulla menetelmällä.

Virumaluvun vaikutus laskukaavan antamiin arvoihin on melko pieni, joten suuruusluokaltaan oikea luku riittää tulosten arvioimiseksi. Suurempi virumaluku antaa pienempiä kutistuman arvoja.

5.1.3 Industrigolv, Betongrapport nr13, 2008

Industrigolv, Betongrapport nr13, 2008 – julkaisussa on halkeamavälin laskentakaava 21 (23):

$$w = a \cdot \varepsilon_{cs} \approx (1 - R_{10,20}/100) \cdot n \cdot h_1 \cdot \varepsilon_{cs} \quad (21)$$

Missä:

ε_{cs}	on kutistuman suuruus
$R_{10,20}$	on kuitubetonin jäännöslujuuskerroin
h_1	on laatan korkeus
n	on halkeamaleveyden ja pintavalun korkeuden suhde väliltä 1-3, mikäli tarkempaa tutkimustietoa ei ole, käytetään arvoa 3

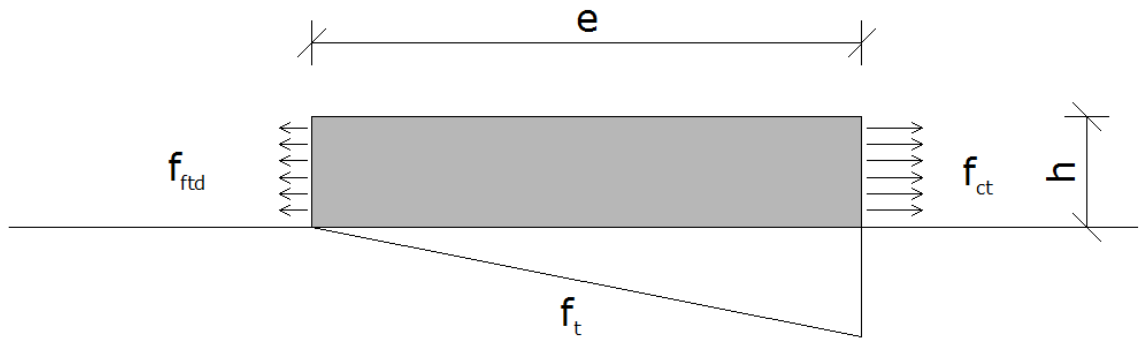
Laskukaavassa halkemaleveyteen vaikuttavina parametreina on kuitubetonin jäännöslujuuskerroin, laatan korkeus sekä kutistuma. Tämän lisäksi kaavassa on kerroin n , joka kuvastaa halkeamavälin ja pintavalun korkeuden suhdetta. Lähtökohtana suhdeluvulle on 3, eli halkeamaväli on kolminkertainen pintavalun paksuuteen verrattuna. Kuten Betonilehden kaavassakin, voidaan muuttujaksi ottaa pintavalun korkeus.

5.2 Oma matemaattinen malli halkeilulle

Halkeamavälin ja halkeamaleveyden laskennan tavoitteena on luoda yksinkertainen matemaattinen malli halkeamavälin ja halkeamaleveyden laskennalle ja verrata laadittua mallia kirjallisuuslähteissä esitettyihin malleihin. Muuttujiksi laskentamallille valittiin betonin kokonaiskutistuma, betonin vetolujuus, kuitubetonin jäännösvetolujuus, pinalattian paksuus sekä pinalattian ja alustan välinen tartuntajännitys.

Halkeamaleveyden arvioimiseksi tulee ensin arvioida halkeamaväliä. Halkeamavälin perusteella voidaan arvioida halkeamaan kertyvän kutistuman suuruutta ja täten halkeamaleveyttä. Halkeamavälin määrittämiseksi luotiin vapaakappalekuva, jonka lähtökohtana on, että satunnaisessa kohdassa pintavalua on halkeama. Tavoitteena on määrittää seuraavan halkeaman etäisyys edellisestä.

Oletetaan, että halkeamarajapinnassa betonin kutistumasta aiheutunut vetojännitys on jäännösvetolujuuden suuruinen, eli tartunta alustaan tai betonin kutistuma eivät aiheuta halkeaman reunalla betoniin vetoa. Oletetaan että tartuntajännityksen aiheuttama vetojännitys kasvaa lineaarisesti siirryttäessä halkeamasta pois päin. Tällöin voidaan arvioida etäisyyttä, millä betonin vetolujuus ylitetään ja syntyy uusi halkeama.



Kuva 5.3 vapaakappalekuvaaja.

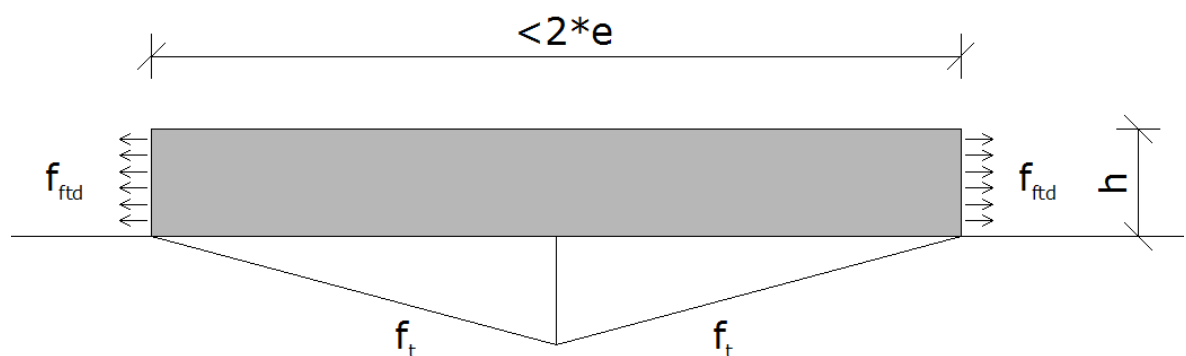
Kuvassa 5.3 on esitetty vapaakappalekuvan avulla halkeamavälin syntymiseen yksinkertaistettu analogia. Kuvan termit ovat seuraavat:

f_{ftd}	on kuitubetonin jäännösvetolujuus
f_{ct}	on betonin vetolujuus
f_t	on tartuntajännitys
h	on laatan korkeus
e	on halkeamaväli

Tällöin halkeamavälille voidaan johtaa kaava:

$$e = \frac{(f_{ct} - f_{ftd}) \cdot h}{f_t} \quad (22)$$

Tämän lisäksi tarvitsee huomioida tilanne, jossa toinen halkeama syntyy sattumanvaraisesti kauemmas edellisestä halkeamasta, kuin saatu etäisyys e , mutta kuitenkin maksimissaan $2 \cdot e$ etäisyydelle edellisestä. Tällöin vapaakappalekuva peilautuu sillä kummastakaan suunnasta tarkastellessa ei ylitetä betonin vetojännitystä. Tällöin vapaakappalekuvaaja on seuraavanlainen:



Kuva 5.4 Vapaakappalekuva kahden satunnaisen halkeaman välin ollessa alle kaksinkertainen kuvan 5.3 tapauksessa laskettuun väliin.

Nyt vapaakappalekuva on käytännössä identtinen Jürgen Mandl:n (22) esittämän halkeamavälin laskennan perusteena olevan kuvan kanssa ja halkeamavälin kaavaa johdattaessa päästään samaan lopputulokseen. Merkittävänä erona laskentamalleissa on se, että Mandl:n laskukaava halkeamavälille on niin sanotusti varmalla puolella, sillä hänen las-

kentamallissa oletetaan seuraavan halkeaman syntyvän maksimaaliselle etäisyydelle edellisestä. Tällöin myös halkeamaleveydet ovat maksimaalisen suuria.

Käytännön tilanteessa keskimääräiset halkeamavälit ovat todennäköisesti jotain edellä esitettyjen skenaarioiden väliltä. Mikäli edellistä halkeamaa seuraava satunnainen halkeama syntyy maksimissaan 2^{e} etäisyydelle edellisestä, ei näiden halkeamien välille todennäköisesti synny halkeamaa. Mikäli taas seuraava satunnainen halkeama syntyy kauemmas kuin 2^{e} , syntyy välille todennäköisesti halkeama.

Matemaattinen malli on siinä määrin samankaltainen Jürgen Mandl:n esittämän laskentamenetelmän kanssa, että halkeamaleveyttä ei erikseen tarkastella. Halkeamaleveyden osalta päädyttäisiin samaan laskukaavaan johtuen mallin yksinkertaisuudesta. Keskimääräinen halkeamaväli menetelmälläni olisi todennäköisesti esitettyjen ääripäiden puolivälissä, joka tarkoittaa, että halkeamavälit sekä halkeamaleveydet olisivat kautta linjan arviolta 25 % pienemmät, kuin Mandl:n menetelmällä saatavat tulokset. Samankaltaisuudesta johtuen johdetun laskentamenetelmän tuloksia ei erikseen taulukoida tutkimukseen.

Tarkemman matemaattisen mallin luominen rajataan tutkimuksen ulkopuolelle. Tarkempi matemaattinen malli vaatii käytännössä FEM-ohjelmistojen käyttöä ja tilanteen jonkinasteista simulointia tai iterointia. Tämän lisäksi tarkempaa mallia laatimassa olisi hyvä tuntea pinalattian tarkkaa toimintaa halkeamien ympärillä esimerkiksi testikappaleita koestamalla, jotta voidaan tarkastella, pettäkö esimerkiksi pinalattian ja alustan välinen tartunta paikallisesti halkeaman kohdalla ja kuinka pitkälle halkeamasta tulee edetä, jotta tartunta on hyvä.

5.3 Laskentakaavojen vertailu

Eri lähteissä esitetyt laskentakaavat poikkeavat toisistaan merkittävästi. Ainostaan Mandl:n laskentakaavassa on ylipäänsä esitetty laskukaava halkeamaväleille. Mandl:n laskentakaavassa eri pinalaatan paksuuksille saadaan paksuudesta riippuvat halkeamaleveydet. Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohjeessa ei oteta halkeamavälin laskentaan kantaa, mutta halkeamaväli esiintyy muuttujana laskukaavassa. Ruotsalaisen Industrigolv'in laskentakaavassa esiintyy halkeamavälin ja pinalattian paksuuden suhdelukua kuvaava kerroin, jolloin halkeamaväli tulee karkeasti huomioitua laskuissa. Suhdeluvuksi oletetaan 3, kun tarkempaa tietoa halkeamaväleistä ei ole.

Betoni-lehden, BY 66:den sekä Industrigolv'in laskukaavoissa esiintyvät halkeamaväli, jäännösvetolujuus sekä kutistuman suuruus, mutta termejä lasketaan eri tavalla. Industrigolv'in kaavassa halkeamaväliä arvioidaan laatan paksuuden suhteen kertoimella. Industrigolv'in laskukaavassa jäännösvetolujuuden sijaan käytetään jäännöslujuuskerrointa. BY 66:n laskukaava on ainoa, jossa otetaan viruman vaikutus huomioon.

6 Laskelmien tulokset ja mitoitusohje

Laskelmat suoritettiin kaikkien kaavojen osalta taulukkolaskentaohjelmalla. Mandl:n kaavojen tapauksessa laskettiin sekä halkeamaväli, että halkeamaleveys. Muilla laskentakaavoilla laskettiin ainoastaan halkeamaleveydet. Laskelmissa oletettiin betoniksi C30/35 lujuusluokan betoni, jonka kimmomoduuli on 33GPa ja jonka vetolujuuden mitoitusarvo on 2,9 MPa.

Laskukaavojen parametrit eroavat toisistaan, joten taulukkolaskennan muuttujissa on eroja kaavojen kesken. Mandl:n sekä BY 66:n laskukaavojen tapauksessa laskettiin halkeamaleveyden ja jäännösvetolujuuden suhdetta ja Mandl:n laskentakaavalla myös halkeamavälin ja jäännösvetolujuuden suhde. Industriegolvin kaavan tapauksessa laskettiin halkeamaleveyden ja jäännöslujuuskertoimen suhde, joka kuitenkin on jossain määrin verrannollinen muiden kaavojen tapauksessa käytettyyn jäännösvetolujuuteen, sillä jäännösvetolujuuksien skaala laskelmissa on nolasta betonin vetolujuuden arvoon 2,9 MPa.

Mandl:n ja Industriegolvin laskukaavoilla suoritettiin taulukkolaskelmat vaihteleville laatanpaksuuksille 10mm porrastuksella välille 30-100 mm. BY 66:n laskukaavassa ei esiintynyt parametrinä laatan paksuutta, joten sen tapauksessa taulukkolaskelmat suoritettiin vaihteleville halkeamaväleille 50 mm porrastuksella välille 50-300 mm. Kaikista taulukoista laadittiin kuvaajat, joissa esitetään edellä mainitut laskentatulokset neljällä eri kutistuman arvolla. Kutistuman arvoiksi valittiin 0,3 ‰, 0,5 ‰, 0,7 ‰ sekä 1,0 ‰. Valitut kutistuman arvot edustavat tyypillistä betonin kutistuman vaihteluväliä.

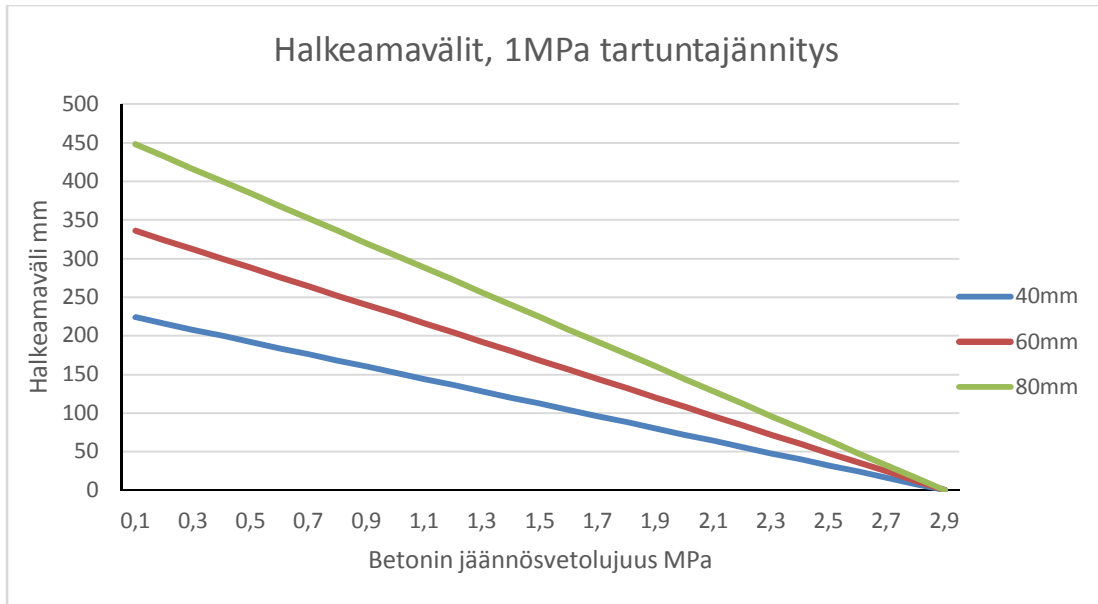
6.1 Jürgen Mandl:n laskentamenetelmä

Halkeamavälejä ja halkeamaleveyksiä tutkittiin taulukkolaskentaohjelmalla eri laatan paksuuksille 10 mm:n välien välille 30-100 mm. Nämä laskelmat suoritettiin kolmelle erisuuruuselle pinalattian ja alustan rajapinnan suuntaiselle tartuntajännitykselle. Tartuntajännityksiksi valittiin 1,0 MPa, 1,5 MPa sekä 2,0 MPa, jotka perustuvat kirjallisuuslähteistä löytyviin halkeamaleveyden suositus- ja minimiarvoihin.

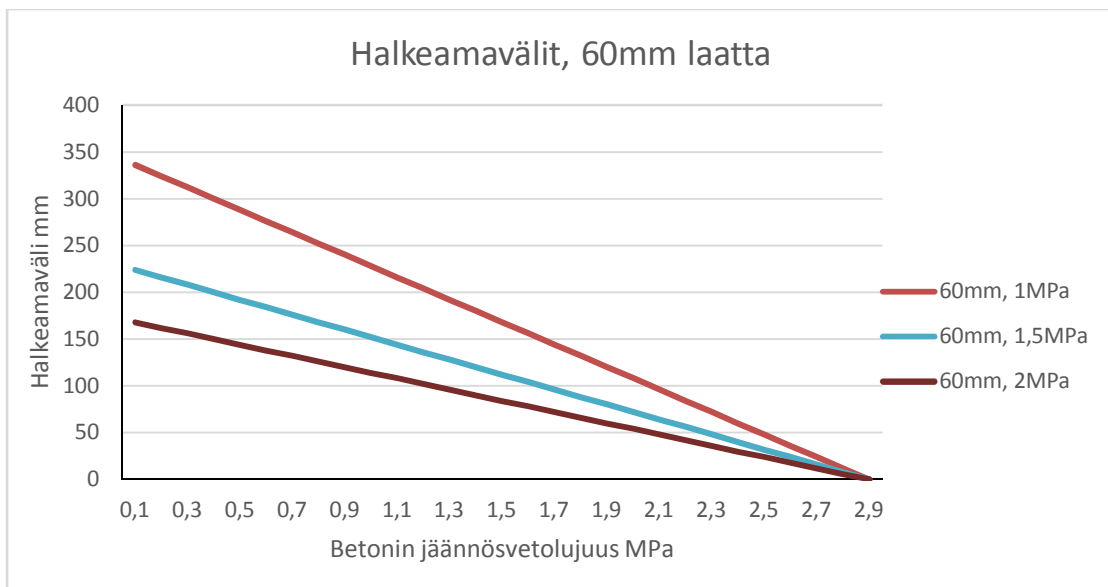
Laskennan tuloksena saatuja halkeamavälejä ja halkeamaleveyksiä verrattiin toisiinsa eri muuttujien suhteen, jotta muuttujien vaikutus tulee paremmin selville. Työn tekstiosiossa laskentamenetelmän tuloksia käsitellään rajallisesti. Laatan paksuuden osalta tutkimuksen runko-osassa tarkastellaan 40 mm, 60 mm sekä 80 mm pintalaatan paksuuksia. Tarkemmat kuvaajat kaikille laatan paksuuden sekä tartunnan arvoille löytyvät liitteistä.

6.1.1 Halkeamaväli

Halkeamavälin suuruus laskettiin kaikille laatan paksuuden arvoille, sekä kaikille pinalattian ja alustan välisen tartunnan arvoille. Halkeamaväliä tarkastellaan 40 mm, 60mm sekä 80 mm pintalaatan paksuuksilla ja kaikilla valituilla tartunnan arvoilla. Kaikilla paksuuksilla ja tartunnoilla olevat halkeamavälin kuvaajat löytyvät tutkimuksen liitteistä.

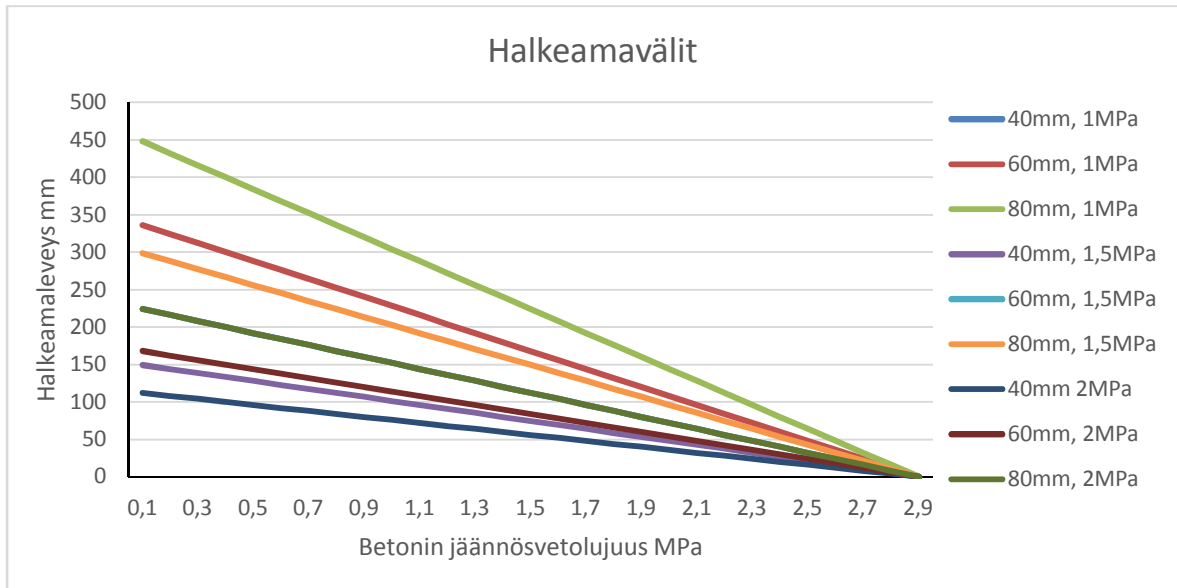


Kuva 6.1, Halkeamavälit 1MPa tartuntalujuudella eri laatan paksuuksille.



Kuva 6.2, Halkeamavälit 60mm laatalle eri tartuntajännityksen arvoilla

Kuvasta 6.1 nähdään, että laskennallinen halkeamaväli vaihtelee laatan paksuuden mukaan melko paljon. Kuvasta 6.2 nähdään, että tartuntalujuus pintalaatan ja alustan välillä vaikuttaa melko paljonkin. Toisin kuin laatan paksuuteen, joka valitaan tapauskohtaisesti, tartunnan laatuun voidaan vaikuttaa.



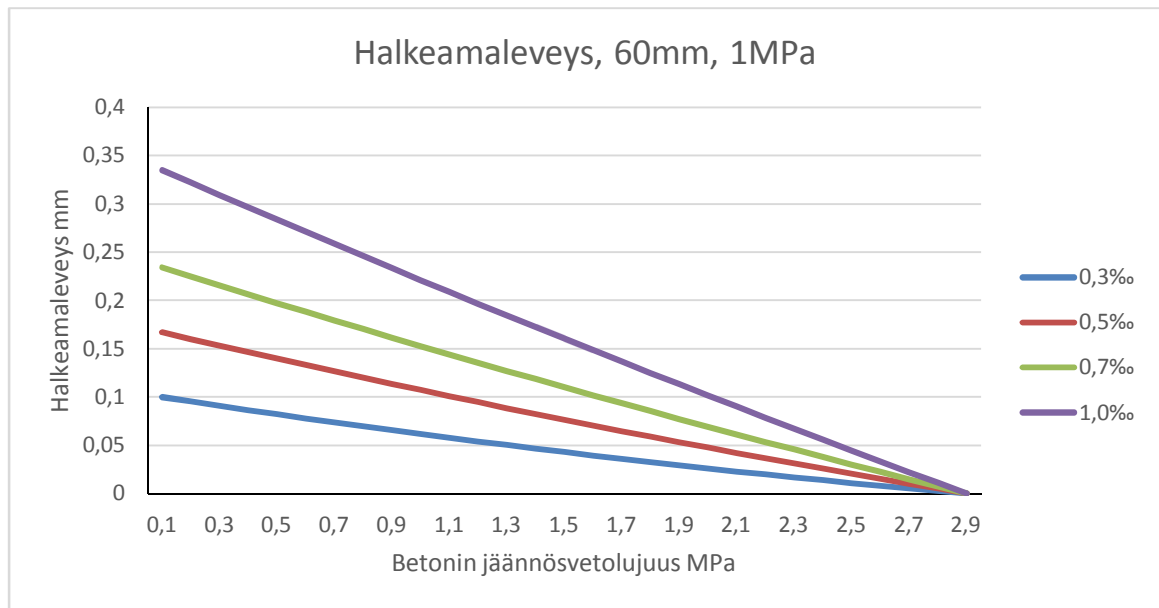
Kuva 6.3, Halkeamavälit 40-80 mm laatanpaksuuksille eri tartuntajännitysten arvoilla.

Kuvasta 6.3 nähdään, että halkeamaväli vaihtelee laatan paksuuden ja tartuntajännityksen suhteen merkittävästi. Halkeamavälit vaihtelevat noin 100-450 mm välillä.

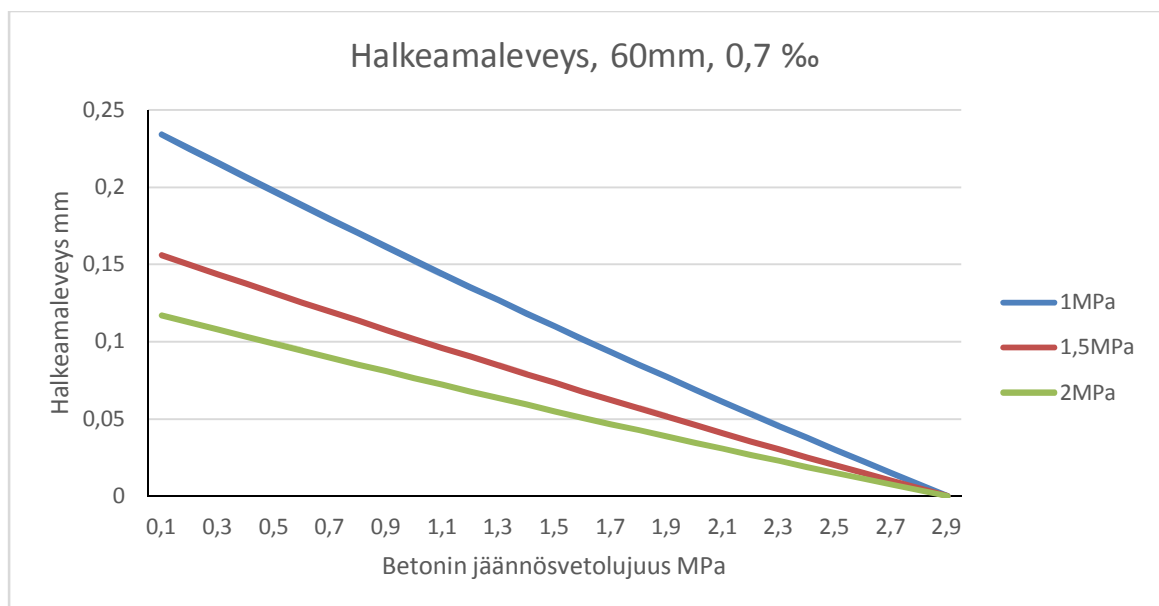
6.1.2 Halkeamaleveys

Halkeamaleveydet laskettiin taulukkolaskentana eri suuruisille pintalaatan paksuuksille 10mm välein välille 30-100 mm. Halkeamaleveyttä tarkasteltiin neljällä kutistuma-arvolla: 0,3 %, 0,5 %, 0,7 % sekä 1,0 %. Nämä kutistuma-arvot kuvaavat suhteellisen hyvin tavanomaista kutistuman vaihteluväliä. Normaaleissa lattiabetoneissa kutistuman suuruus on yleensä esitetyn vaihteluvälin yläpäässä ja vaihteluvälin pienemmät arvot kuvaavat pienen kutistuman betonia ja esimerkiksi kutistumaa vähentävien lisäaineiden vaikutusta.

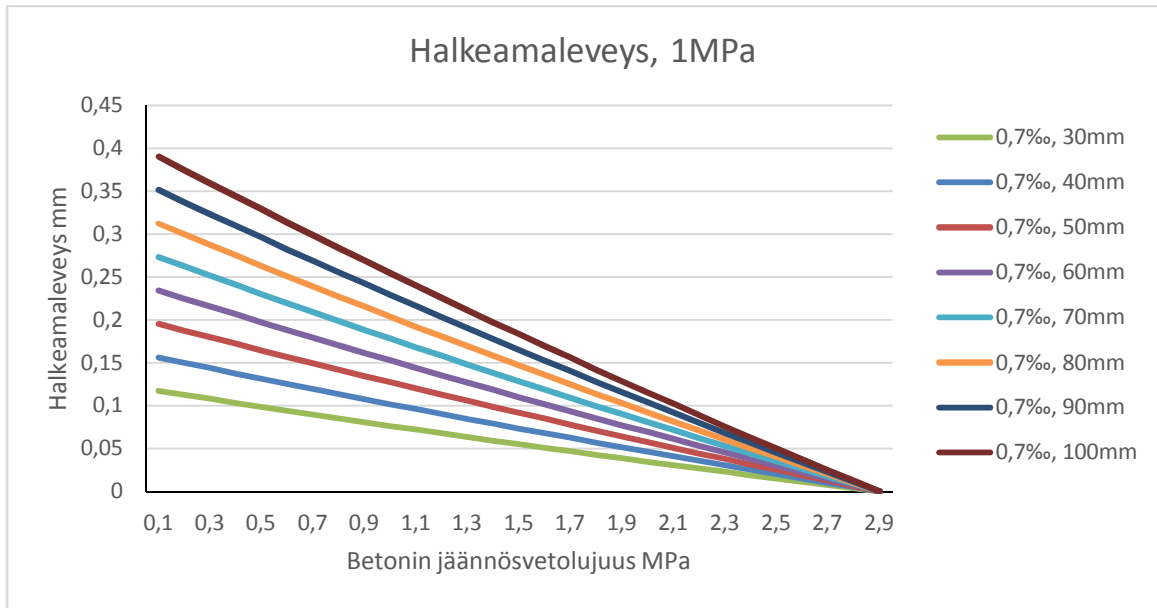
Tulokset on tutkimuksen runko-osassa esitetty pääasiassa 60mm paksun pintalaatan suhteen pois lukien laatan paksuuden vaikutusta halkeamaleveyteen esittävä kuvaaja. Yksi lattian paksuus valittiin havainnollistamaan eri muuttujien vaikutusta laskennan tuloksiin. Kuvaajat kaikille pintalaatan paksuuksille eri tartunnoilla ja kutistuman suuruuksilla löytyvät tutkimuksen liitteistä.



Kuva 6.4, Halkeamaleveydet eri kutistuma-arvoilla 60 mm pintalaatalla ja 1 MPa tartuntajännityksen arvolla.

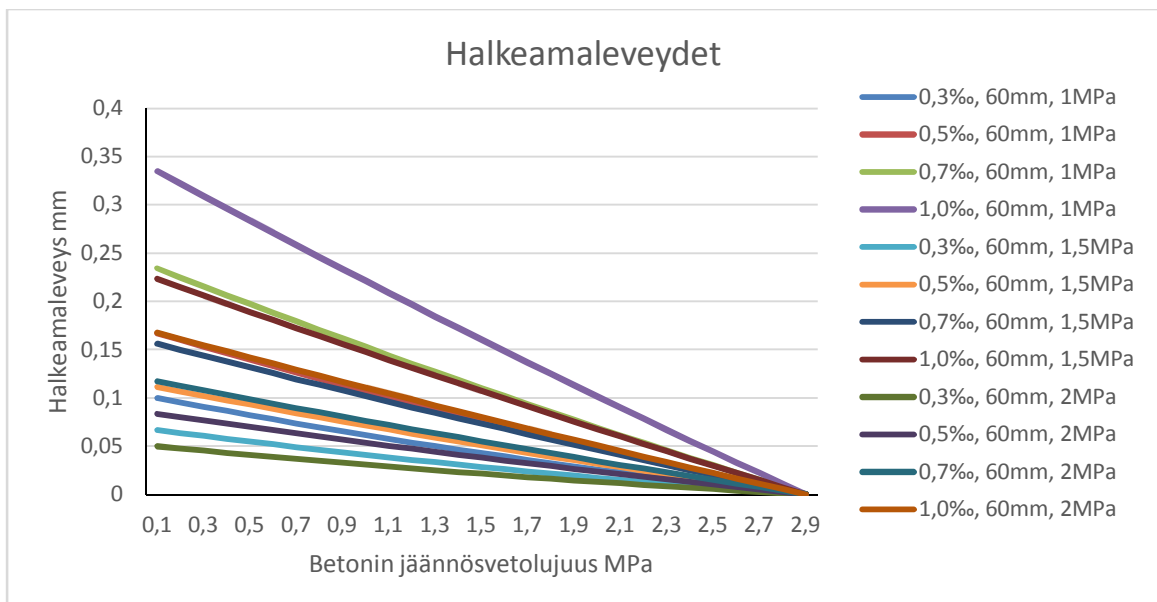


Kuva 6.5, Halkeamaleveydet eri tartuntajännityksen arvoilla 60 mm pintalaatalla ja 0,7 ‰ kutistumalla.



Kuva 6.6, Halkeamaleveydet 1 MPa tartuntajännityksellä 0,7 % kutistuma-arvolla eri pinta-alaan paksuuksilla.

Kuvista 6.4, 6.5 ja 6.6 nähdään miten yksittäiset muuttujat vaikuttavat laskukaavan antamiin tuloksiin. Esimerkiksi poimitun 60 mm paksun pintalattian tapauksessa 1 MPa tartunnalla halkeamaleveydet vaihtelevat kutistumasta riippuen 0,1-0,35 mm välillä. Tartuntalujuuden vaihdellessa 1-2 MPa halkeamaleveydet vaihtelevat 0,12-0,24 mm välillä. Kummankin muuttujan vaikutus laskennallisiin halkeamaleveyksiin on prosentuaalisesti melko suuri. Kutistuman suuruutta alentamalla tai tartuntajännitystä kasvattamalla saadaan laskennallista halkeamaleveyttä laskettua kymmeniä prosentteja. Pintalattian paksuuden vaikutus halkeamaleveyksiin on melkolailla lineaarinen pintalattian paksuuteen.

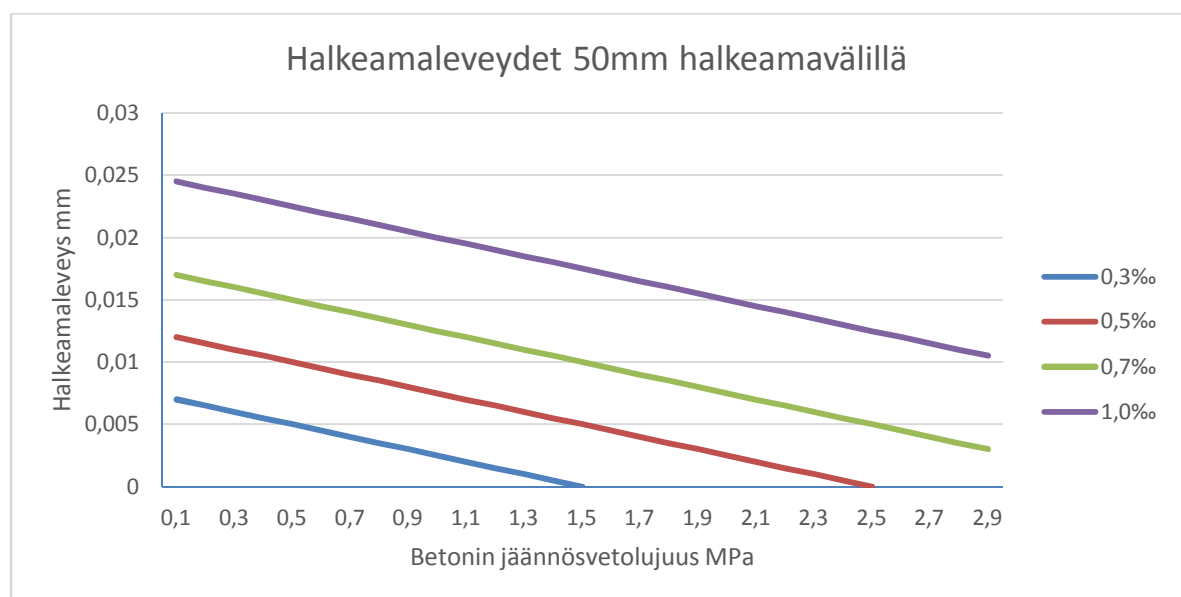


Kuva 6.7, halkeamaleveydet eri kutistuma-arvoilla ja tartuntajännityksillä 60 mm pintalattialle.

Kuvasta 6.7 nähdään kuinka suuri yhteisvaikutus kutistuman suuruudella ja tartuntalujuudella on halkeamavälin kokoon. Heikolla tartunnalla ja suurella kutistumalla laskennalliset halkeamaleveydet ovat suurimmillaan 0,35mm luokkaa, kun pienimmillään korkealla tartuntajännityksen arvolla ja pienellä kutistumalla päästään alle 0,1mm halkeamaväliin.

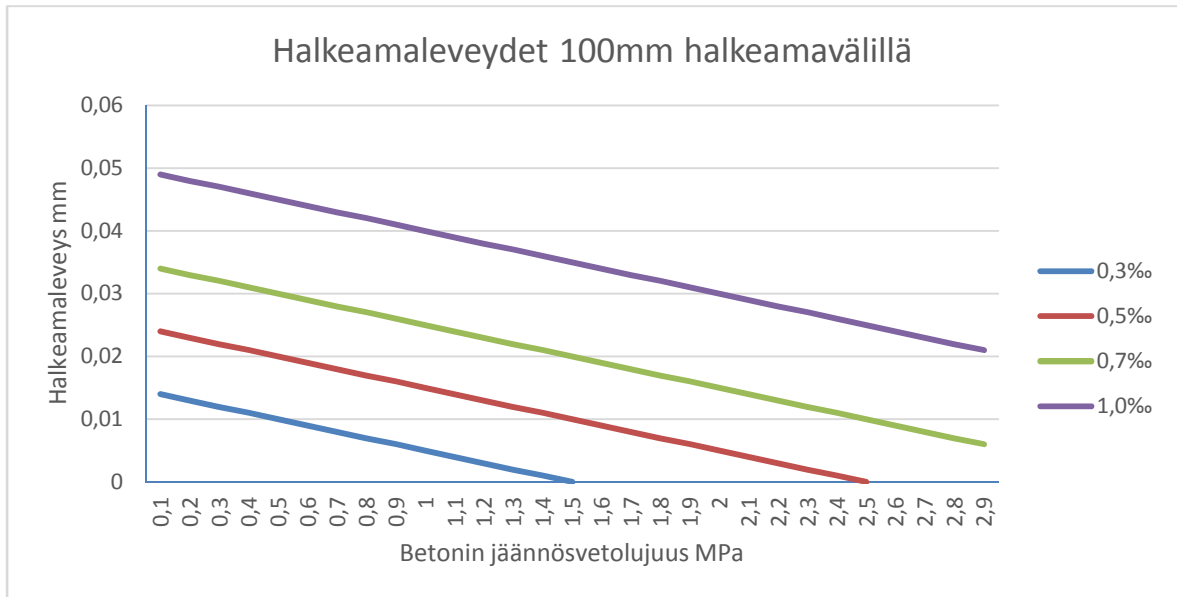
6.2 BY 66, Teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohje

BY 66:n laskukaavalla laskettiin taulukkolaskelmat erisuuruisille halkeamaväleille 50 mm välein välille 50-300 mm. Kaikissa taulukoissa on halkeamaleveyden kuvaajat samoille kutistuman suuruuksille, kuin muissakin laskelmissa. Muista laskelmista poiketen laskukaava antaa pienemmille kutistuma-arvoille negatiivisia tuloksia suurilla jäännösvetolujuuden arvoilla. Negatiiviset tulokset on rajattu kuvaajista pois.



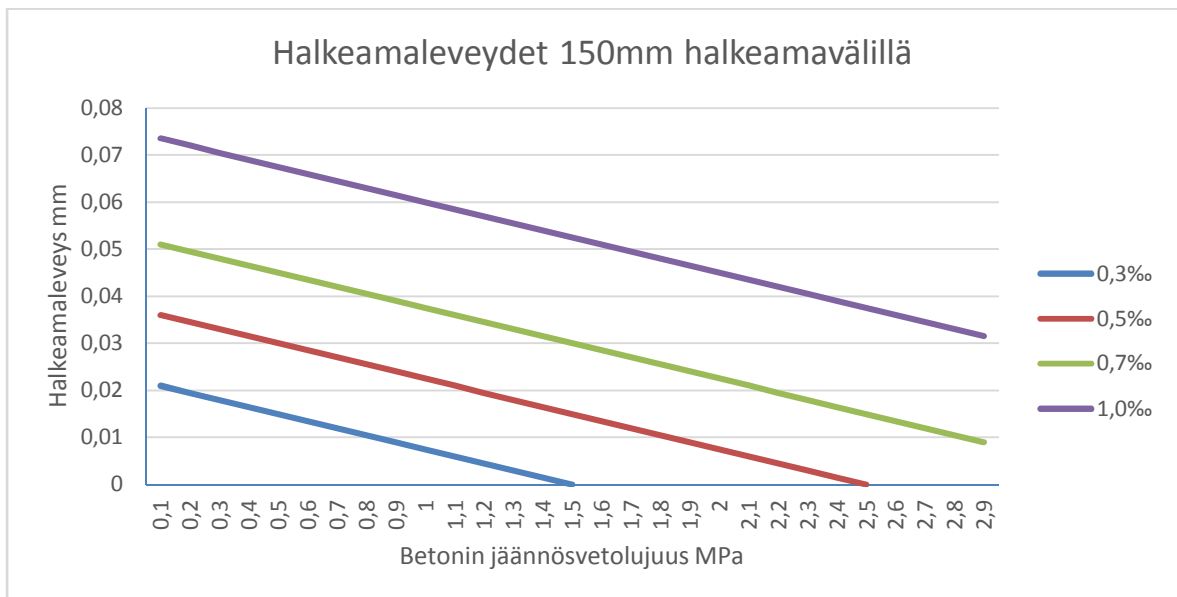
Kuva 6.8, Halkeamaväli BY 66:n kaavalla 50 mm halkeamavälillä.

Kuvaasta 6.8 nähdään, että 50 mm halkeamavälillä halkeamaleveyksiksi muodostuu kutistuman suuruudesta riippuen suurimmillaan 0,007-0,025 mm. Halkeamaleveydet pienenevät kuitubetonin jäännösvetolujuuden kasvaessa lineaarisesti. 0,3 % sekä 0,5 % kutistuma-arvoilla halkeamaleveydet kutistuvat nollaan jo ennen betonin vetolujuuden suuruisen jäännösvetolujuuden saavuttamista. 0,7 % ja 1,0 % kutistuman arvoilla halkeamavälit ovat asteikon loppupäässä pienimmillään 0,003 ja 0,015 mm.



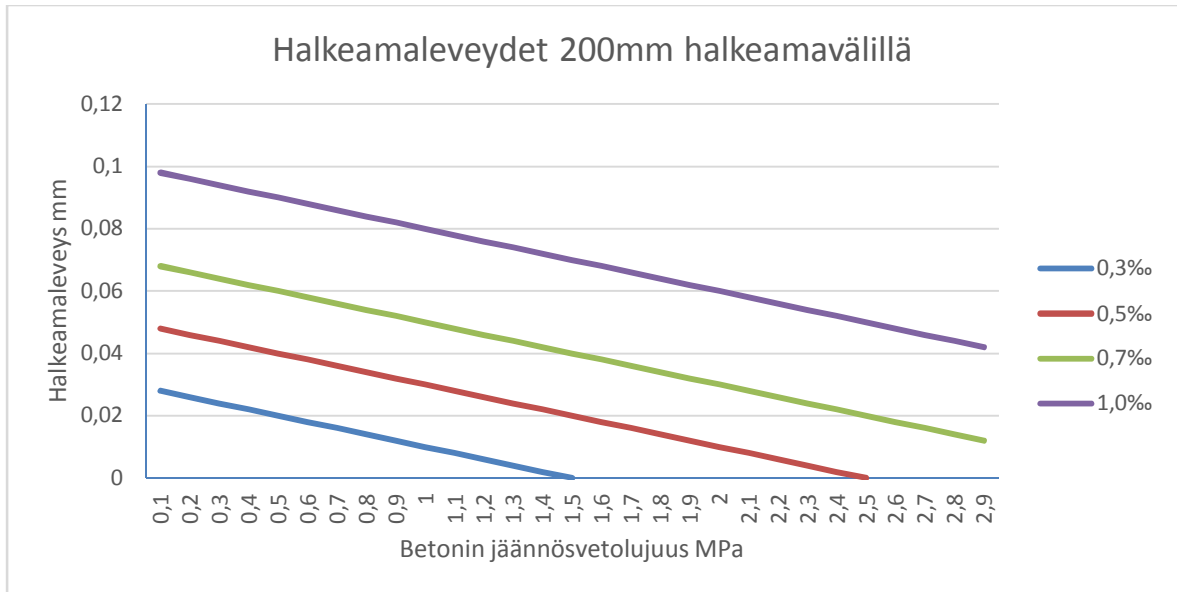
Kuva 6.9, Halkeamaväli BY 66:n kaavalla 100 mm halkeamavälillä.

Kuvasta 6.9 nähdään, että 100 mm halkeamavälillä halkeamaleveyksiksi muodostuu kutistuman suuruudesta riippuen suurimmillaan 0,015-0,045 mm. Halkeamaleveydet pienenevät kuitubetonin jäännösvetolujuuden kasvaessa lineaarisesti. 0,3 % sekä 0,5 % kutistuma-arvoilla halkeamaleveydet kutistuvat nollaan jo ennen betonin vetolujuuden suuruisen jäännösvetolujuuden saavuttamista. 0,7 % ja 1,0 % kutistuman arvoilla halkeamavälit ovat asteikon loppupäässä pienimmillään 0,0063 ja 0,021 mm.



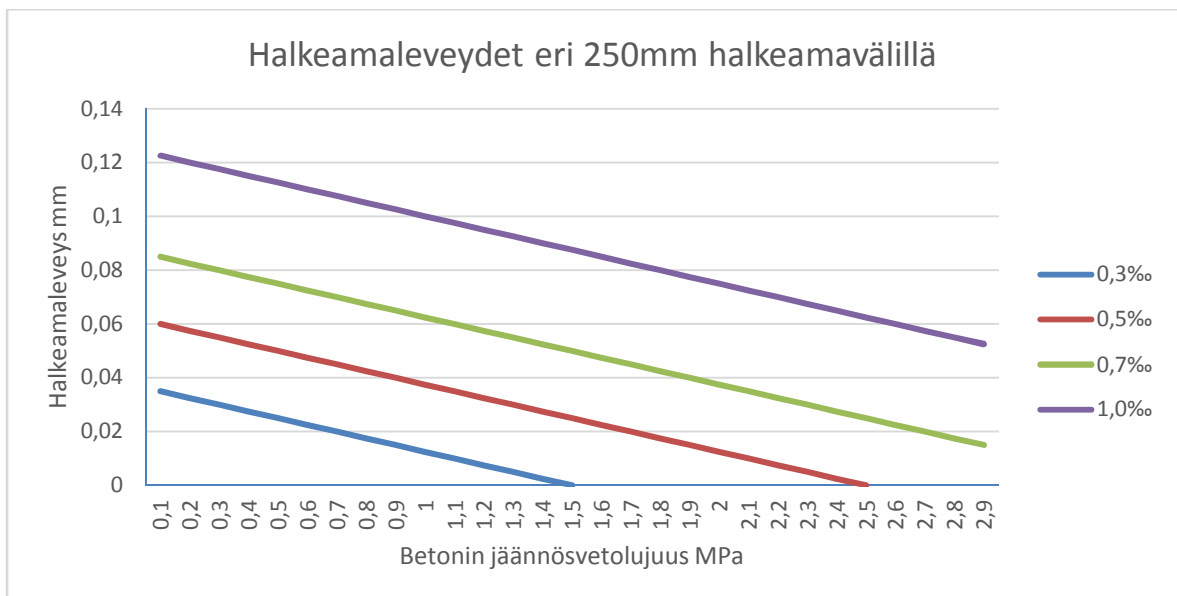
Kuva 6.10, Halkeamaväli BY 66:n kaavalla 150 mm halkeamavälillä.

Kuvasta 6.10 nähdään, että 150 mm halkeamavälillä halkeamaleveyksiksi muodostuu kutistuman suuruudesta riippuen suurimmillaan 0,012-0,075 mm. Halkeamaleveydet pienenevät kuitubetonin jäännösvetolujuuden kasvaessa lineaarisesti. 0,3 % sekä 0,5 % kutistuma-arvoilla halkeamaleveydet kutistuvat nollaan jo ennen betonin vetolujuuden suuruisen jäännösvetolujuuden saavuttamista. 0,7 % ja 1,0 % kutistuman arvoilla halkeamavälit ovat asteikon loppupäässä pienimmillään 0,095 ja 0,041 mm.



Kuva 6.11, Halkeamaväli BY 66:n kaavalla 200 mm halkeamavälillä.

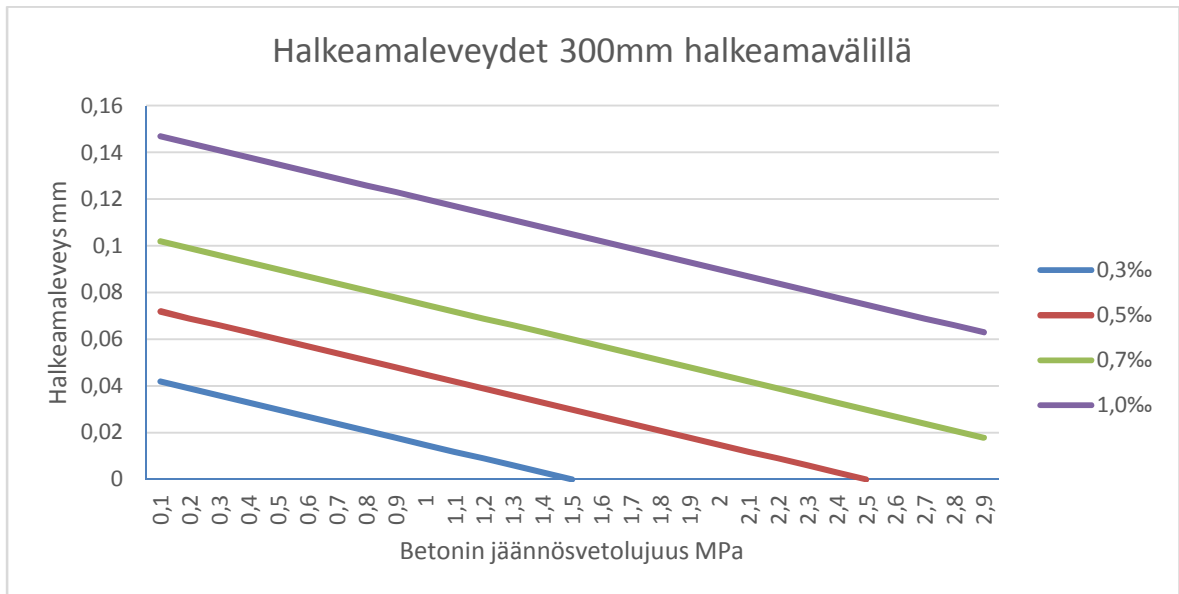
Kuvasta 6.11 nähdään, että 200 mm halkeamavälillä halkeamaleveyksiksi muodostuu kutistuman suuruudesta riippuen suurimmillaan 0,03-0,095 mm. Halkeamaleveydet pienenevät kuitubetonin jäännösvetolujuuden kasvaessa lineaarisesti. 0,3 % sekä 0,5 % kutistuma-arvoilla halkeamaleveydet kutistuvat nollaan jo ennen betonin vetolujuuden suuruisen jäännösvetolujuuden saavuttamista. 0,7 % ja 1,0 % kutistuman arvoilla halkeamavälit ovat asteikon loppupäässä pienimmillään 0,012 ja 0,041 mm.



Kuva 6.12, Halkeamaväli BY 66:n kaavalla 250 mm halkeamavälillä.

Kuvasta 6.12 nähdään, että 50 mm halkeamavälillä halkeamaleveyksiksi muodostuu kutistuman suuruudesta riippuen suurimmillaan 0,035-0,125 mm. Halkeamaleveydet pienenevät kuitubetonin jäännösvetolujuuden kasvaessa lineaarisesti. 0,3 % sekä 0,5 % kutistuma-arvoilla halkeamaleveydet kutistuvat nollaan jo ennen betonin vetolujuuden suuruisen

jäännösvetolujuuden saavuttamista. 0,7 ‰ ja 1,0 ‰ kutistuman arvoilla halkeamavälit ovat asteikon loppupäässä pienimmillään 0,015 ja 0,055 mm.

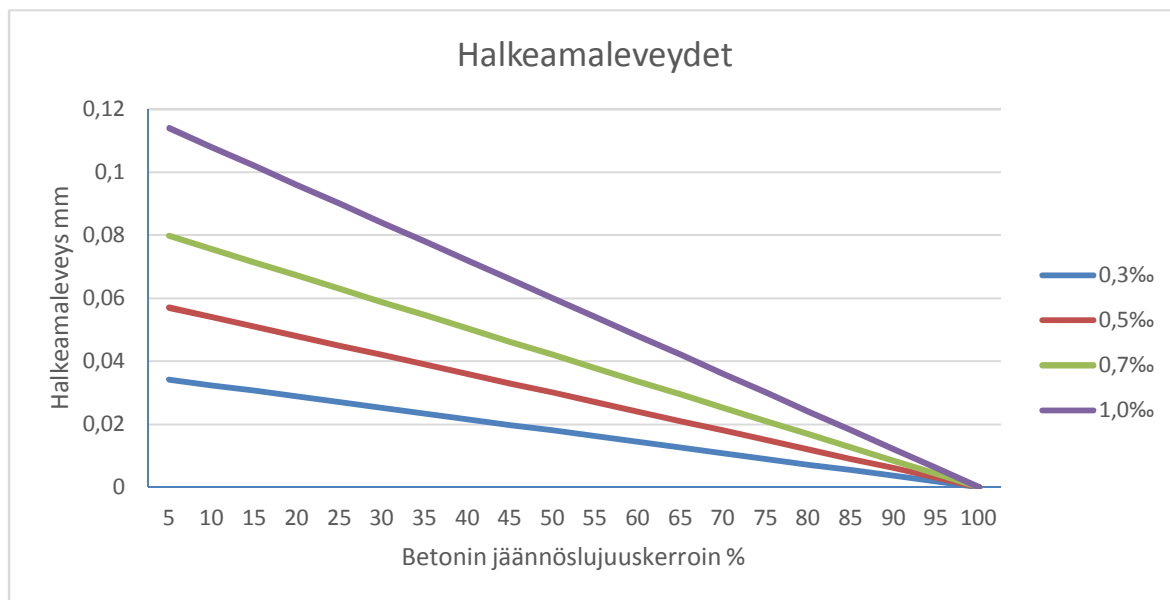


Kuva 6.13, Halkeamaväli BY 66:n kaavalla 300 mm halkeamavälillä.

Kuvasta 6.13 nähdään, että 50mm halkeamavälillä halkeamaleveyksiksi muodostuu kutistuman suuruudesta riippuen suurimmillaan 0,04-0,15 mm. Halkeamaleveydet pienenevät kuitubetonin jännösvetolujuuden kasvaessa lineaarisesti. 0,3 ‰ sekä 0,5 ‰ kutistuma-arvoilla halkeamaleveydet kutistuvat nollaan jo ennen betonin vetolujuuden suuruisen jännösvetolujuuden saavuttamista. 0,7 ‰ ja 1,0 ‰ kutistuman arvoilla halkeamavälit ovat asteikon loppupäässä pienimmillään 0,02 ja 0,065 mm.

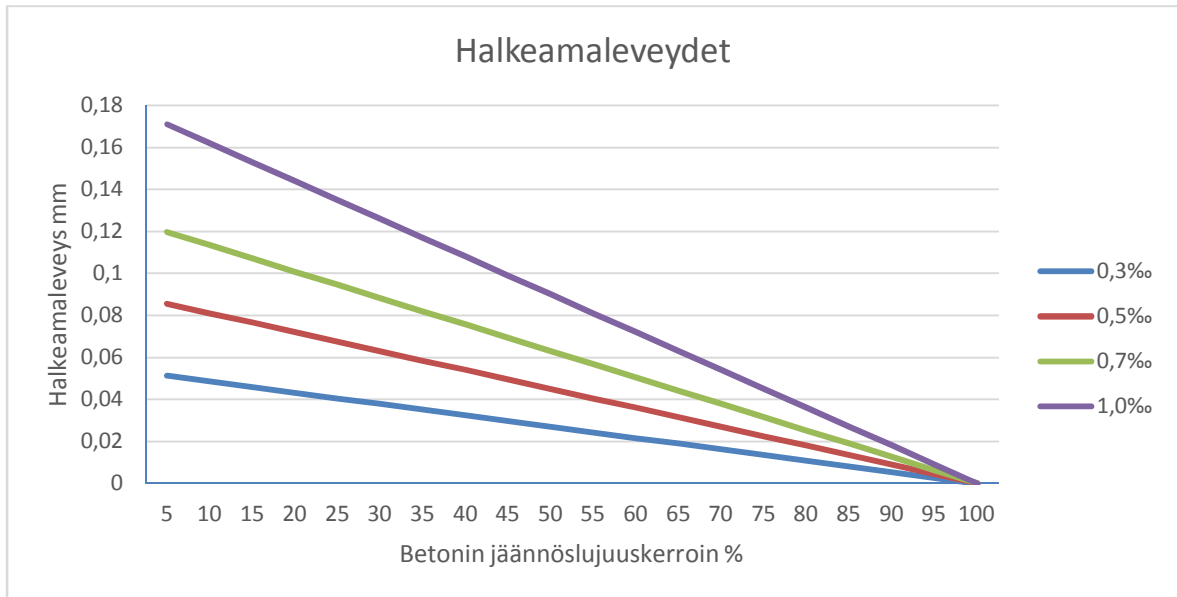
6.3 Industrigolv, Betongrapport nr13, 2008

Industrigolv:in laskukaavasta laskettiin taulukkolaskelmat eri laatan paksuuksille 10 mm välein välille 30-100 mm. Kaikissa taulukoissa on halkeamaleveyden kuvaajat samoille kutistuman suuruuksille, kuin muissakin laskelmissa. Laskelmista esitetään kuvaajat 40 mm, 60 mm ja 80 mm laatanpaksuuksille. Loput laskelmat löytyvät liitteistä.



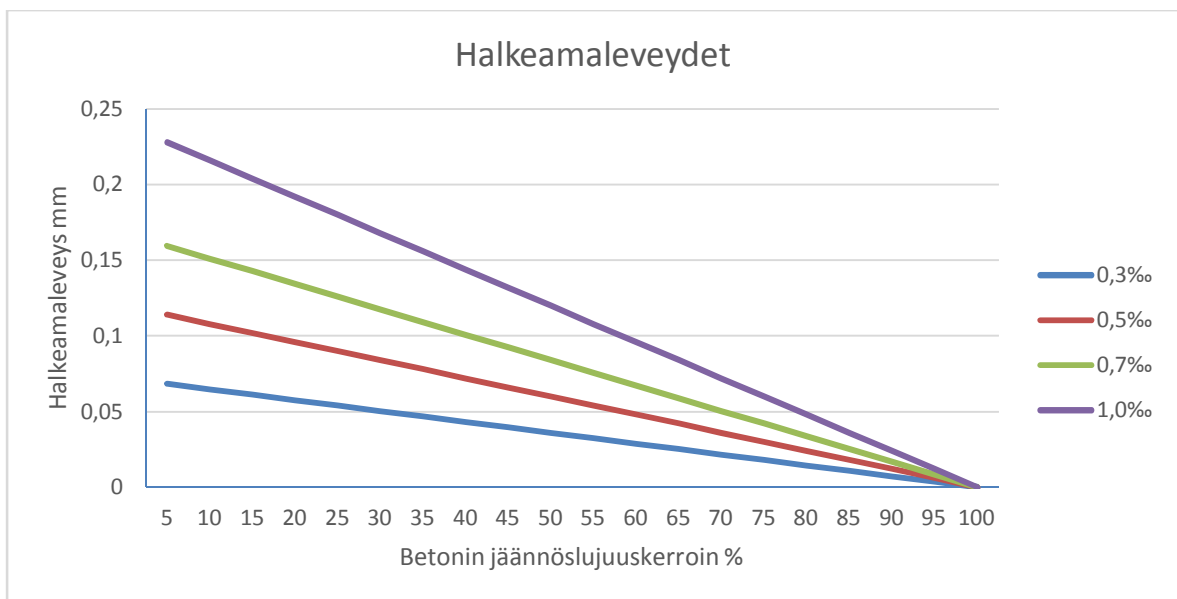
Kuva 6.14, Halkeamaleveydet Industrigolv:in kaavalla 40 mm pintabetonipaksuudella.

Kuvasta 6.14 nähdään, että halkeamaleveyksiksi 40 mm paksulla pintalattialla muodostuu kutistuman suuruudesta riippuen suurimmillaan 0,035-0,115 mm. Halkeamaleveydet pienenevät kuitubetonin jäännösvetolujuuden kasvaessa lineaarisesti siten, että kaikkien eri kutistuman arvoja vastaavat halkeamaleveydet ovat 0, kun jäännöslujuuskertoimen arvo on 100 %.



Kuva 6.15, Halkeamaleveydet Industrigolv'in kaavalla 60 mm pintabetonipaksuudella.

Kuvasta 6.15 nähdään, että halkeamaleveyksiksi 60 mm paksulla pintalattialla muodostuu kutistuman suuruudesta riippuen suurimmillaan 0,05-0,17 mm. Halkeamaleveydet pienenevät kuitubetonin jännösvetolujuuden kasvaessa lineaarisesti siten, että kaikkien eri kutistuman arvoja vastaavat halkeamaleveydet ovat 0, kun jännösluujuskertoimen arvo on 100 %.

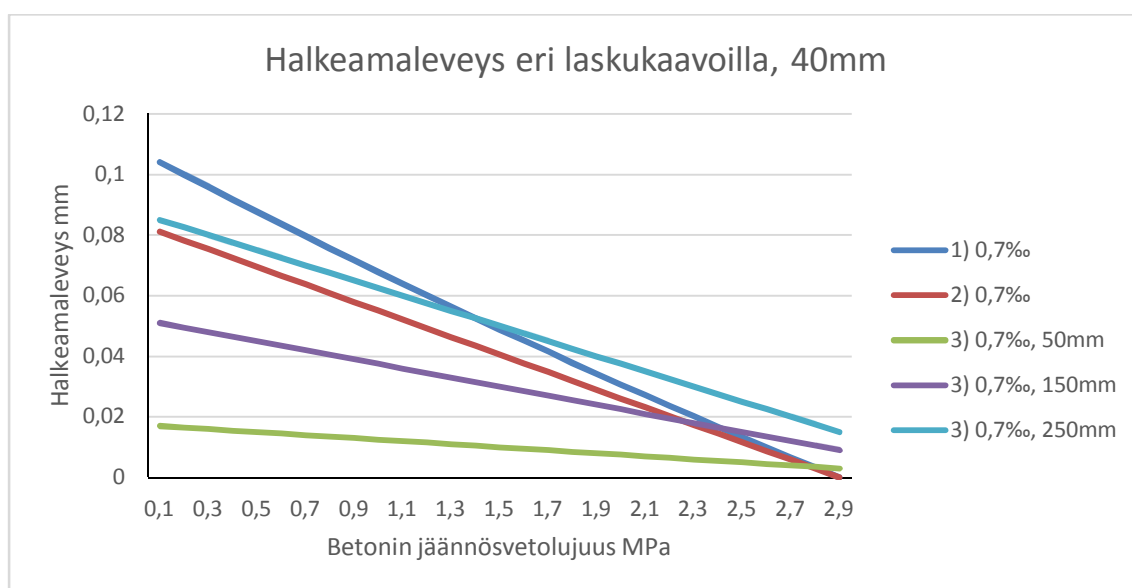


Kuva 6.16, Halkeamaleveydet Industrigolv'in kaavalla 80 mm pintabetonipaksuudella.

Kuvasta 6.16 nähdään, että halkeamaleveyksiksi 80 mm paksulla pintalattialla muodostuu kutistuman suuruudesta riippuen suurimmillaan 0,07-0,225 mm. Halkeamaleveydet pienenevät kuitubetonin jännösvetolujuuden kasvaessa lineaarisesti siten, että kaikkien eri kutistuman arvoja vastaavat halkeamaleveydet ovat 0, kun jännösluujuskertoimen arvo on 100 %.

6.4 Tulosten vertailu

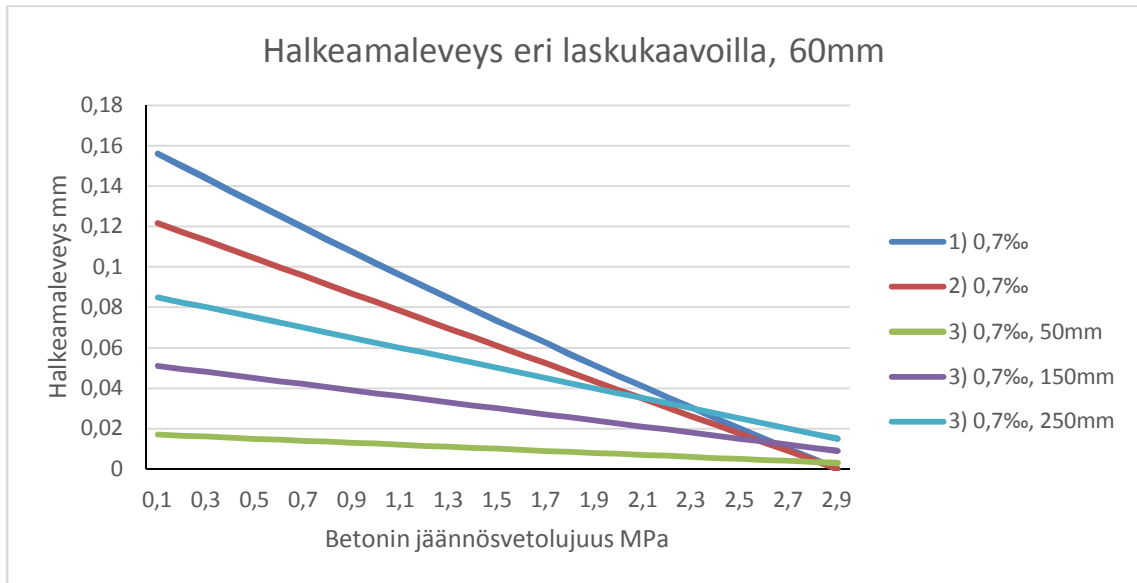
Laskentatulosten vertailun vuoksi valikoidut tapaukset eri laskentakaavojen tuloksista laitetiin yhteisiin kuvaajiin. Mandl:n laskukaavan tulokset on merkitty kuvissa merkinnällä 1), Industriegolv:n laskukaavan tulokset 2) ja BY 66:n laskukaavan tulokset 3). Mandl:n ja Industriegolv:n laskukaavojen tuloksista voitiin valita samoja laatan paksuuksia. Industriegolv:n laskukaavoissa muuttujana on jäännöslujuuskerroin prosentteina. Jäännöslujuuskerroin on vertailulaskelmassa skaalattu muiden laskelmien jäännösvetolujuuden arvoiksi, jotta saadaan vertailukelpoisia lukuarvoja. Mandl:n kaavan tuloksista käytettiin 1,5 MPa tartunnan antamia tuloksia. BY 66:n laskentakaava ei ota kantaa laatan paksuuteen, joten yhdistettyihin tuloksiin valittiin muutama eri halkeamavälin arvo. Laskelmat suoritettiin 0,7 ‰ kutistuman suuruudella, sillä se edustaa melko tyypillistä suuruusluokkaa lattiabetonin kutistumassa.



Kuva 6.17, Eri laskukaavojen halkeamaleveydet 0,7 ‰ kutistuman suuruudella ja 40 mm paksulla pinalattialla.

Kuvasta 6.17 nähdään, että halkeamaleveyksiksi 40 mm paksulla pinalattialla muodostuu kutistuman suuruudesta riippuen suurimmillaan 0,017-0,105 mm. Halkeamaleveydet pienenevät kuitubetonin jäännösvetolujuuden kasvaessa lineaarisesti. Mandl: ja Industriegolv:n laskukaavoilla saadut tulokset ovat samaa suuruusluokkaa Industriegolv:n tulosten ollessa n. 20 % pienemmät, kuin Mandl:n kaavalla saatavat tulokset. BY 66:n laskukaavoilla saaduista tuloksista 250 mm halkeamavälillä lasketut arvot ovat lähimpänä muiden laskukaavojen tuloksia.

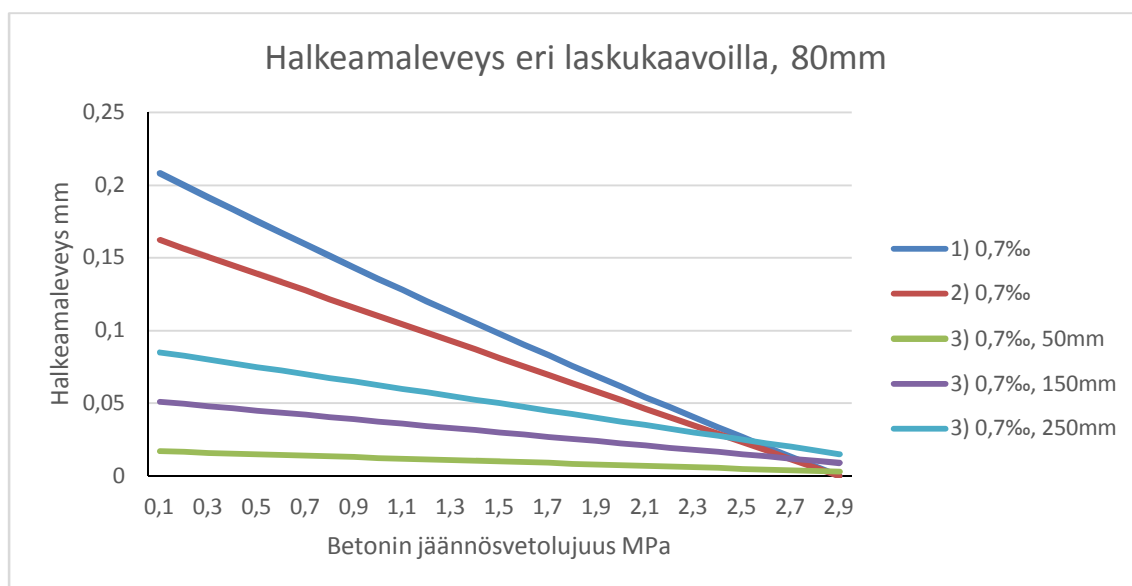
Mandl:n kaavoilla 40 mm paksuisella pinalattialla ja 1,5 MPa tartuntajännityksellä halkeamaväli on suurimmillaan n. 145 mm. Industriegolv:n kaavassa halkeamaväliksi arvioidaan 3-kertainen pinalattian paksuus, joka 40 mm pinalattialla on 120 mm. Halkeamaväleiltään suhteellisen lähellä oleva BY 66: laskukaavan 150 mm halkeamavälin halkeamaleveyden maksimi-arvo on n. 40-60 % pienempi kuin vertailtavien laskukaavojen halkeamaleveydet.



Kuva 6.18, Eri laskukaavojen halkeamaleveydet 0,7 ‰ kutistuman suuruudella ja 60 mm paksulla pinalattialla.

Kuvasta 6.18 nähdään, että halkeamaleveyksiksi 60 mm paksulla pinalattialla muodostuu kutistuman suuruudesta riippuen suurimmillaan 0,017-0,155 mm. Halkeamaleveydet pienenevät kuitubetonin jännösvoiman kasvaessa lineaarisesti. Mandl:n ja Industriegolv:n laskukaavoilla saadut tulokset ovat samaa suuruusluokkaa Industriegolv:n tulosten ollessa n. 20 % pienemmät, kuin Mandl:n kaavan tulokset. BY 66:n laskukaavoilla saaduista tuloksista 250 mm halkeamavälillä lasketut arvot ovat lähimpänä muiden laskukaavojen tuloksia, mutta pienemmällä halkeamaleveyksillä ollaan täysin eri suuruusluokassa halkeamaleveyden arvojen suhteen.

Mandl:n kaavoilla 60 mm paksuisella pinalattialla ja 1,5 MPa tartuntajännityksellä halkeamaväli on suurimmillaan n. 225 mm. Industriegolv:n kaavassa halkeamaväliksi arvioidaan 3-kertainen pinalattian paksuus, joka 60 mm pinalattialla on 180 mm. Halkeamaväleiltään suhteellisen lähellä oleva BY 66:n laskukaavan 250 mm halkeamavälin halkeamaleveyden maksimiarvo on lähes 50 % pienempi, kuin Mandl:n kaavojen halkeamaleveyden maksimiarvo.



Kuva 6.19, Eri laskukaavojen halkeamaleveydet 0,7 ‰ kutistuman suuruudella ja 80 mm paksulla pinalattialla.

Kuvasta 6.19 nähdään, että halkeamaleveyksiksi 80mm paksulla pinalattialla muodostuu kutistuman suuruudesta riippuen suurimmillaan 0,017-0,21 mm. Halkeamaleveydet pienenevät kuitubetonin jäännösvetolujuuden kasvaessa lineaarisesti. Mandl:n ja Industrigolv'in laskukaavoilla saadut tulokset ovat samaa suuruusluokkaa Industrigolv'in tulosten ollessa n. 20 % pienemmät, kuin Mandl:n kaavoilla saatavat tulokset. BY 66:n laskukaavoilla saaduista tuloksista millään halkeamavälillä lasketut halkeamaleveyden maksimiarvot eivät ole lähellä muiden laskukaavojen halkeamaleveyden maksimiarvoja.

Mandl:n kaavoilla 80mm paksuisella pinalattialla ja 1,5 MPa tartuntajännityksellä halkeamaväli on suurimmillaan n. 300 mm. Industrigolv'in kaavassa halkeamaväliksi arvioidaan 3 kertainen pinalattian paksuus, joka 80mm pinalattialla on 240 mm. Halkeamaväleiltään suhteellisen lähellä oleva BY 66:n laskukaavan 250 mm halkeamavälin halkeamaleveyden maksimiarvo on n. 50-65 % pienempi, vertailtavien laskukaavojen halkeamaleveyden maksimiarvot.

6.5 Tulosten yhteenveto

Laskukaavojen tuloksia vertailevia kuvaajia tarkastelemalla nähdään, että Industrigolv'in sekä Mandl:n laskukaavojen tulokset ovat keskenään samaa suuruusluokkaa pinalattian ja alustan välisen tartuntajännityksen ollessa 1,5 MPa. Industrigolv'in halkeamaleveydet ovat kautta linjan n. 20 % pienempiä verrattuna Mandl:n kaavojen tuloksiin, mutta myös oletettu halkeamaväli on n. 15 % pienempi, kuin Mandl:n laskentakaavan antama halkeamavälin maksimiarvo.

Pinalattian ja alustan tartuntajännityksen ollessa 2 MPa on Mandl:n ja Industrigolv'in tulokset käytännössä identtisiä. Vastaavasti 1 MPa tartuntajännityksellä Industrigolv'in halkeamaleveyden arvot jäävät noin puoleen Mandl:n laskentakaavan arvoista. Mandl:n kaavojen laskentatuloksista nähdään, että pinalattian ja alustan välisen tartunnan parantuessa myös halkeamaleveydet pienenevät.

BY 66:n laskentakaavalla saatavat tulokset eivät ota huomioon pinalattian paksuutta. Verrattaessa BY 66:n laskukaavan halkeamaleveyden tuloksia halkeamavälillä, joka vastaa karkeasti muiden laskukaavojen halkeamavälejä, jäädään halkeamaleveyden arvoissa karkeasti puoleen muiden kaavojen antamista halkeamaleveyden arvoista. Toisaalta myöskään Mandl:n halkeamaleveyden laskukaavassa ei huomioida pinalattian paksuutta vaan ainoastaan pinalattian paksuudesta riippuva halkeamaväli.

Laskennan tuloksista nähdään, että kutistumalla sekä pinalattian ja alustan välisellä tartunnalla on todella suuri merkitys halkeamaleveyksiin. Näihin seikkoihin voidaan vaikuttaa pinalattiaa suunniteltaessa. Betonin kutistuman rajoittaminen onnistuu tietyissä rajoissa ja esimerkiksi SRA-lisäaineiden käyttö ei kaikissa tapauksissa ole taloudellisesti kannattavaa. Hyvä tartunta voidaan kuitenkin saavuttaa huolellisella valmistelulla. Myös pinalattian paksuus vaikuttaa halkeiluun merkittävästi. Kaikissa tapauksissa pinalattian paksuus ei kuitenkaan ole vapaasti valittavissa muista rajoitteista johtuen. Kokonaisuudessaan kaikki laskentakaavat antavat odotetun kaltaisia tuloksia. On kuitenkin mahdotonta sanoa antaako mikään tutkimuksen laskelmista todellista tilannetta vastaavia tuloksia.

Kirjallisuuslähteissä esitettyjen laskukaavojen ongelmana on niiden teoreettinen luonne. Ainoastaan Mandl:n esittämälle laskukaavalle tarjotaan perusteluja laskukaavan toiminnan puolesta vapaakappalekuvan muodossa. Muille laskukaavoille ei tarjota kirjallisuuslähteissä laajempaa taustatietoa esimerkiksi kaavan johtamisen muodossa. Laskentamenetelmät eivät huomioi betonin epätasaisesta kuivumisesta aiheutuvaa pinalaatan pinnan ja pohjan välistä kutistumaeroa ja vain yksi laskukaava huomioi viruman vaikutusta ja sitäkin vain karkealla tasolla.

Mandl:n esittämä laskentamenetelmä halkeamavälille ja halkeamaleveydelle vaikuttaa potentiaalisimmalta jatkokehityksen kohteelta, sillä kaavalle on esitetty teoreettiset perusteet, joihin päädyin myös oman laskennallisen tarkastelun seurauksena. Tämän lisäksi haastattelussa kävi ilmi, että käytännön kohteissa saavutetut tulokset ovat kutakuinkin linjassa laskukaavan tulosten kanssa.

Suhteellisen hyvin paikkansa pitävän halkeilun laskentamenetelmän laatimisen yhdeksi potentiaaliseksi haasteeksi nousee tulosten hajonta käytännön kohteissa. Jotta kaavan paikansäilyvyyttä voidaan arvioida, täytyy vertailun kohteena olevan kohdeaineiston ominaisuudet tuntea hyvin. Laskentamallia kehittäessä myös viruman vaikutusta jännityksiin olisi hyvä pystyä huomioimaan.

6.6 Laskentakaavat ja kuitubetonilattian mitoitus

Kuitubetonilla valmistetun pintabetonilattian mitoitus kutistumishalkeilulle on nykytilanteessa kokemuksesta ja osin sattumanvaraista. Eri jäännösvetolujuuksilla tehdyistä lattoista on kertynyt kuituja ja kuitubetonia toimittaville yrityksille käytännön kokemusta, mutta käytännön mitoitusohjeita ei ole ollut saatavilla. Eri kuitumäärillä ja jäännösvetolujuuksilla saavutettuja käytännön tuloksia halkeamaleveyksien osalta voidaan verrata tutkimuksen teoreettisiin halkeamaleveyksiin. Teoriapohjainen mitoitus työn tulosten pohjalta voidaan suorittaa kutistuman suuruuden sekä laatan paksuuden pohjalta katsomalla kuvajista tai liitteiden taulukoista yhdistelmälle sopiva jäännösvetolujuuden suuruus.

Mandl:n laskukaavalla päästään suurimpiin halkeamaleveyksiin, joten vertailu käytännön tulosten sekä teorian välillä kannattaa aloittaa niistä lukuarvoista. Tavanomainen kuituanostus pintabetonilattiassa 80/60 teräskuidulle on 25 kN/m^3 , kun tavoitteena on alle 0,3 mm halkeamaleveys. Tällä annosmäärällä jäännöstaivutusvetolujuus on 63 % betonin vetolujuudesta. Laskelmissa käytetylle 2,9 MPa vetolujuudelle tämä tarkoittaisi n. 1,8 MPa jäännöstaivutusvetolujuutta. Kaavan 2 mukaan jäännösvetolujuuden arvoksi saadaan n. 0,9 MPa (9). Kuvassa 6.6 esiintyy suurimmat halkeamaleveyden arvot. Jotta epäedullisella kutistumalla päästään tavoiteltuun alle 0,3 mm halkeamaleveyteen, tulee kuvaajan perusteella jäännösvetolujuuden olla suuruusluokaltaan 1 MPa. Kokemusperäisesti yllä esitetyllä annosmäärällä on saatu hyviä tuloksia ja kaavan laatija haastattelussa kertoi myös havainneensa laskukaavan korreloivan todellisten tilanteiden kanssa suhteellisen hyvin. (22)

7 Johtopäätökset

Työn aiheena oleva pintabetonilattioiden halkeilun hallinta sekä mitoittaminen kuitubetonilla perinteisen raudoitettun betonin sijaan jakautuu kolmeen osa-alueeseen. Betoni on materiaalina luonnostaan kutistuva materiaali, eikä kutistuman suuruuteen voida kuiduilla käytännössä juurikaan vaikuttaa. Kuidut puolestaan toimivat tavanomaisen raudoituksen tavoin siten, että toiminta alkaa vasta rakenteen jo haljettua. Näiden lisäksi vaaditaan vielä onnistunut toteutus eli pintavalun hyvä tartunta alustaansa sekä jälkihoito. Onnistunut halkeilun hallinta siis vaatii siis koostumukseltaan oikeanlaisen betonin ja onnistuneen toteutuksen sekä kuituja, joilla syntyvien halkeamien leveyttä voidaan rajoittaa.

Betonin kutistuma jakautuu kahteen merkittävään kutistumalajiin. Nämä ovat betonin autogeeninen kutistuma sekä kuivumiskutistuma. Betonin autogeeninen kutistuma aiheutuu betonin hydrataatiossa tapahtuvien kemiallisten reaktioiden seurauksena, sillä sementin ja veden kemiallisessa reaktiossa syntyvän sementtikiven tilavuus on pienempi, kuin lähtötuotteilla. Autogeeniseen kutistumaan vaikuttaa pääasiassa betonin vesi-sementtisuhde. Betonin kuivumiskutistuma aiheutuu puolestaan, kun betoniin kemiallisesti sitoutumaton vesi haihtuu ajan kanssa ja betonin tilavuus pienenee. Näiden kutistumalajien lisäksi betonissa tapahtuu plastista kutistumaa sekä lämpömuodonmuutoksista aiheutuvia tilavuuden muutoksia. Plastinen kutistuma vaikuttaa betonipinnan laatuun ja sitä voidaan ehkäistä hyvällä jälkihoidolla sekä käyttämällä betonissa polymeerimikrokuituja.

Betonin kutistumaa voidaan ehkäistä suhteittamalla betoni vähän kutistuvaksi. Tämän lisäksi betonin vetolujuuden kehittyminen sekä vetoviruma vähentävät kutistumishalkeilua. Valun jälkeen alkava betonin kutistuminen ja lujuuden kehitys sekä betonin viruma tapahtuvat samanaikaisesti. Betonin vetolujuus kasvaa, kuin myös kutistuman aiheuttamat vetojännitykset. Viruma puolestaan vähentää vetojännitystä ajan kanssa. Mitä myöhemmin betoni altistuu kutistumalle, sitä parempi kyky betonilla on vastustaa halkeilua. Suuren lujuusluokan omaavilla betoneilla kutistuma on tavanomaisesti suurempaa, kuin pienemmän lujuusluokan betoneilla. Lujuusluokan kasvattaminen ei johda parempaan lopputulokseen johtuen kasvaneesta kutistumasta.

Toteutuksen osalta hyvän tartunnan saaminen pinalattian ja alustan välille on välttämätöntä. Tartunnan ansiosta halkeaman leviäminen rajoittuu, sillä pinalattian ja alustan välillä on kitkaa. Mikäli tartunta paikoitellen on heikkoa tai puuttuu, halkeamaleveys kasvaa koko puutteellisen tartunnan kokoisen alueen kutistuman suuruiseksi, sillä kitka ei pyri rajoittamaan betonin kutistumista heikon tartunnan alueella. Hyvän lattiapinnan aikaansaamiseksi myös jälkihoito on tärkeää. Pitkällä jälkihoidolla kuivumiskutistumaa voidaan siirtää myöhempään vaiheeseen, jolloin vetolujuuden kehitys ehtii alkaa aikaisemmin suhteessa kutistuman aiheuttamaan vetojännitykseen. Jälkihoidolla ehkäistään myös plastista kutistumaa.

Kuitubetoni on perinteiseen raudoitettuun betoniin verrattuna melko uusi rakennusmateriaali. Teräskuitubetonia ja sen käyttöä on tutkittu 1950-luvulta lähtien, ja sen käyttöönotto alkoi suuremmassa mittakaavassa 1990-luvulla. Kuitubetonia on käytetty tavanomaisen raudoituksen lisänä parantamaan betonin muita ominaisuuksia sekä maanvaraisissa lattioissa pääasiallisena raudoituksena. Kuitubetonin rakenteellista käyttöä myös muissa rakenteissa on tutkittu, mutta ongelmana on kuitubetonin rajallinen vetokapasiteetti suhteellisen hauras toiminta sekä mitoitusohjeiden puuttuminen. Rakennusalalla on käytetty pääasiassa

teräskuituja betonin vahvistukseen, mutta myös erilaisten synteettisten kuitumateriaalien käyttö on lisääntynyt ja niiden materiaaliominaisuudet ovat kehittyneet.

Kuitubetoni soveltuu kuitenkin hyvin pintalattioihin, joissa raudoituksen tarkoitus on hallita halkeilua, eikä rakenteellisen kestävyys puolesta tarvita raudoitusta. Tällöin kuituja käyttämällä pyritään rajoittamaan estetyn kutistuman aiheuttaman vetojännityksen aikaansaamaa halkeilua. Kiinnitetyissä pintalattioissa pääasialliset rasitukset tulevat estetyn kutistuman aiheuttamasta vetojännityksestä, jolloin halkeilu ei aiheuta rakenteen kuormankantokyvyn heikkenemistä. Tämä mahdollistaa myös polymeerikuitujen käytön halkeilun hallinnassa.

Halkeamaleveyden ja halkeamavälin laskentaan on toistaiseksi saatavilla vähän kaavoja. Tutkimuksessa päätettiin edetä niillä laskukaavoilla, mitä on saatavilla. Laskentakaavat antoivat samansuuntaisia tuloksia, mutta eri laskukaavojen välillä oli merkittäviä eroja esimerkiksi halkeamavälien suuruuksissa. Potentiaalisimmalta laskukaavalta vaikuttaa Jürgen Mandl:n laatima laskukaava, sillä sen antamien halkeamaleveyksien arvojen on havaittu korreloivan käytännön kohteissa tapahtuneen halkeilun kanssa. Tämän lisäksi kyseiselle laskentamenetelmälle on annettu taustatiedot, joiden perusteella laskukaavat on johdettu.

Teoreettisten laskukaavojen vertailu käytännön tuloksiin on todennäköisesti haastavaa, sillä vertailtava kohdeaineisto tulee tuntea hyvin. Kattavammat käytännön kokeet olisivat hyvä jatkotutkimuksen kohde.

Lähdeluettelo

1. ACI Committee 544. (1996) 544.1R-96: Report on Fiber Reinforced Concrete. 66 s. ISBN: 9780870315282.
2. Suomen Betoniyhdistys. (2012) BLY 13 Polymeerikuidut Betonissa 2012. 13 s. [Viitattu 14.2.2019]. Saatavissa: <http://www.betoniyhdistys.fi/media/julkaisut/by-13-polymeerikuidut-betonissa.pdf>. ISSN 0358-5239.
3. Meriläinen T. Maanvaraisen kuitubetonilattian suunnittelu. [Viitattu 14.2.2019]. Saatavissa: <http://www.bly.fi/File/2TeuvoMerilainen-kuitubetoni-mv-lattiat.pdf>.
4. Suomen Betoniyhdistys. (2014) BY 45/BLY 7 Betonilattiat 2014. Helsinki: BY-Koulutus Oy. 198 s. ISBN 978-952-68068-0-8.
5. SFS-EN 14889-1. (2006) BETONIIN KÄYTETTÄVÄT KUIDUT. OSA 1: TERÄSKUIDUT. MÄÄRITELMÄT, VAATIMUKSET JA VAATIMUSTENMUKAISUUS. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 27 s.
6. Mäntyranta M. (2013) Kantavien teräskuitubetonirakenteiden mitoitus. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Tampere. 167 s.
7. SFS-EN 14889-2. (2006) BETONIIN KÄYTETTÄVÄT KUIDUT. OSA 2: POLYMEERIKUIDUT. MÄÄRITELMÄT, VAATIMUKSET JA VAATIMUSTENMUKAISUUS. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 28 s.
8. SFS-EN 14651. (2009) TEST METHOD FOR METALLIC FIBRE CONCRETE. MEASURING THE FLEXURAL TENSILE STRENGTH (LIMIT OF PROPORTIONALITY (LOP), RESIDUAL). Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 18 s.
9. Suomen Betoniyhdistys. (2018) BY 66 Teräskuitubetonirakenteiden Suunnitteluohje 2018. Helsinki: BY-Koulutus Oy. 92 s. ISBN 978-952-68068-9-1.
10. Suomen Betoniyhdistys. (2018) BY 45/BLY 7 Betonilattiat 2018. Helsinki: BY-Koulutus Oy. 198 s. ISBN 978-952-68619-9-9.
11. Jürgen M, Matsinen M. (2015) Halkeilun hallinta maanvaraisissa betonilattioissa ja pintabetoneissa teräskuitubetonia käyttäen. Betoni. Vol. 2/2015. S. 66-73. ISSN 2323-1262.
12. Komonen J. (2009) Betonirakenteiden kutistuminen ja halkeamien ehkäisy. Rakentajan kalenteri 2010. S.428-439. ISBN-13: 6418616186706.
13. Suomen Betoniyhdistys. (2016) BY 67 Betonin kutistuman ja halkeilun hallinta 2016. Helsinki: BY-Koulutus Oy. 70 s. ISBN 978-952-68619-0-6.
14. Hietala J. (2011) Betonilattioiden kutistuman hallinta. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 129 s.

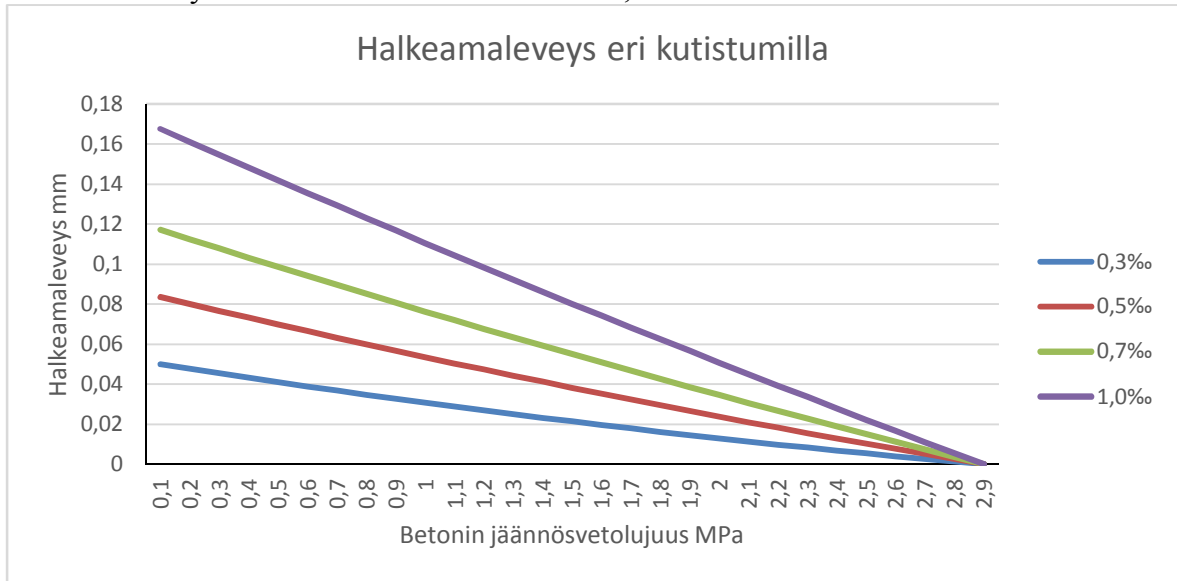
15. SFS-EN 1992-1-1. (2015) EUROKOODI 2: BETONIRAKENTEIDEN SUUNNITTELU. OSA 1-1: YLEISET SÄÄNNÖT JA RAKENNUKSIA KOSKEVAT SÄÄNNÖT. 2. Painos. Helsinki: Suomen standardisoiimisliitto. 219 s.
16. Beushausen H. (2013) Assessment and prediction of drying shrinkage cracking in bonded mortar overlays. Cement and Concrete Research. Vol 53. S.256-266. ISSN 0008-8846
17. Beushausen H. (2006) Failure mechanisms and tensile relaxation of bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage. Cement and Concrete Research. Vol 36, Issue 10. S-1908-1914. ISSN 0008-8846
18. Nykyri T. (2014) Kutistumaa vähentävien lisäaineiden vaikutus betonin kutistumaan. Metropolia Ammattikorkeakoulu. 48 s.
19. Havuaho M. (2012) Betonin kutistumakompensaatioaineet. Kymenlaakson Ammattikorkeakoulu. Kouvola. 36 s.
20. Pitkänen P. (2008) Maanvaraisten betonilattioiden käyritysongelmat. Rakentajain kalenteri 2008. S.419-425
21. B4. (2004) BETONIRAKENTEET, OHJEET 2005. Suomen rakentamismääräyskokoelma Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. 83 s.
22. Mandl J. Haastattelu, aihe: Betonilattioiden halkeilun laskenta. 14.03.2019
23. Industrigolv. (2008) Rekommendationer för projektering, materialval, produktion, drift och underhåll. Ruotsi. Betongrapport nr 13. 296 s. ISBN 91-973445-7-5.

Liiteluettelo

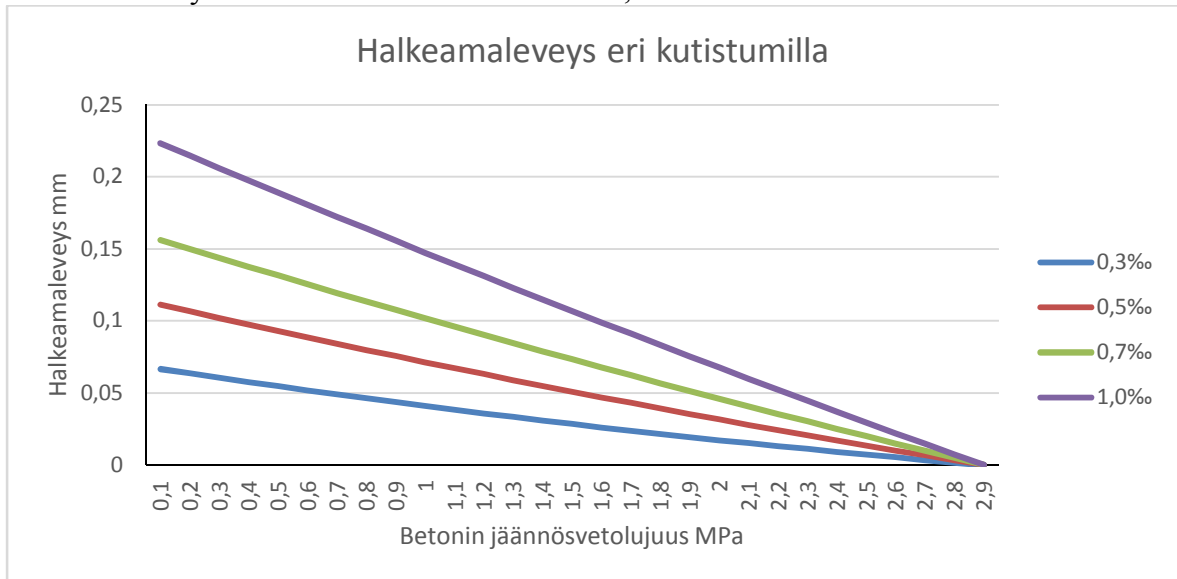
- Liite 1. Halkeamaleveydet Mandl:n kaavalla
- Liite 2. Halkeamaleveydet Industrigolv Betongrapport nr13, 2008 laskukaavalla
- Liite 3. Halkeamavälit Mandl:n kaavalla
- Liite 4. Oman laskukaavan johtaminen

Liite 1. Halkeamaleveydet Mandl:n kaavalla

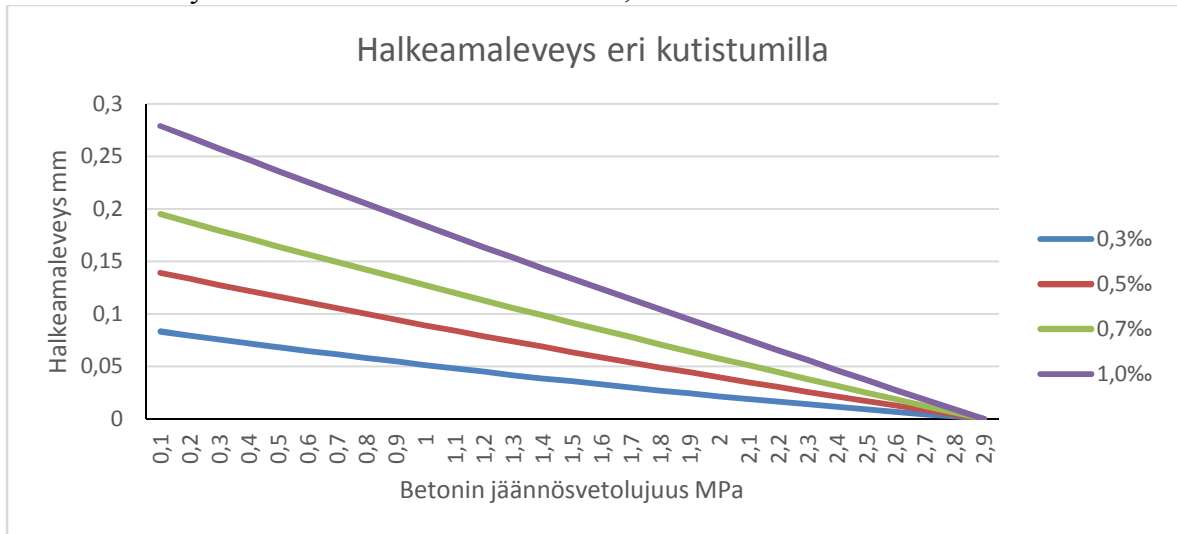
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 30mm laatta, 1MPa tartunta.



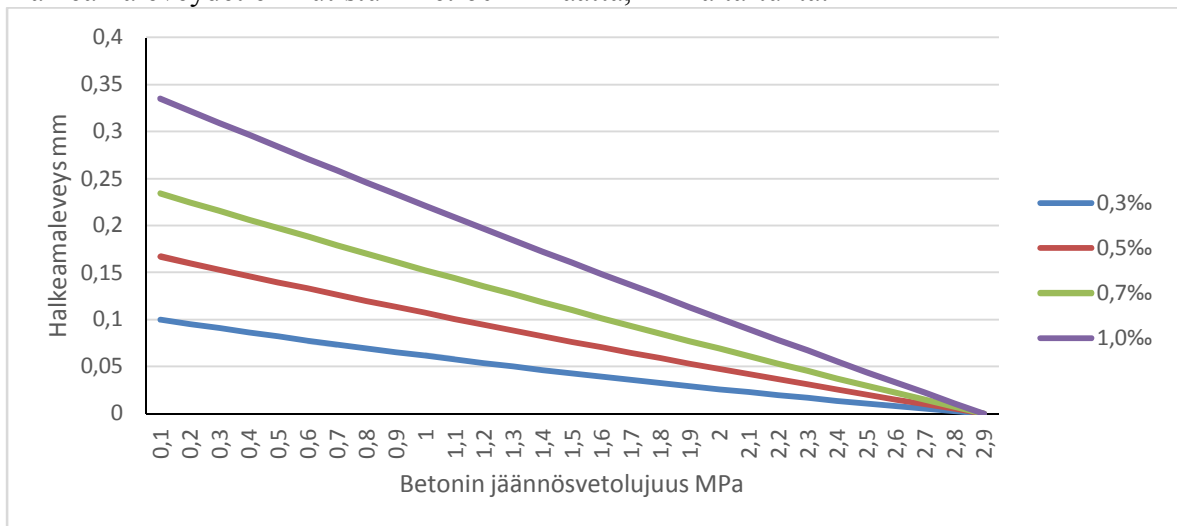
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 40mm laatta, 1MPa tartunta.



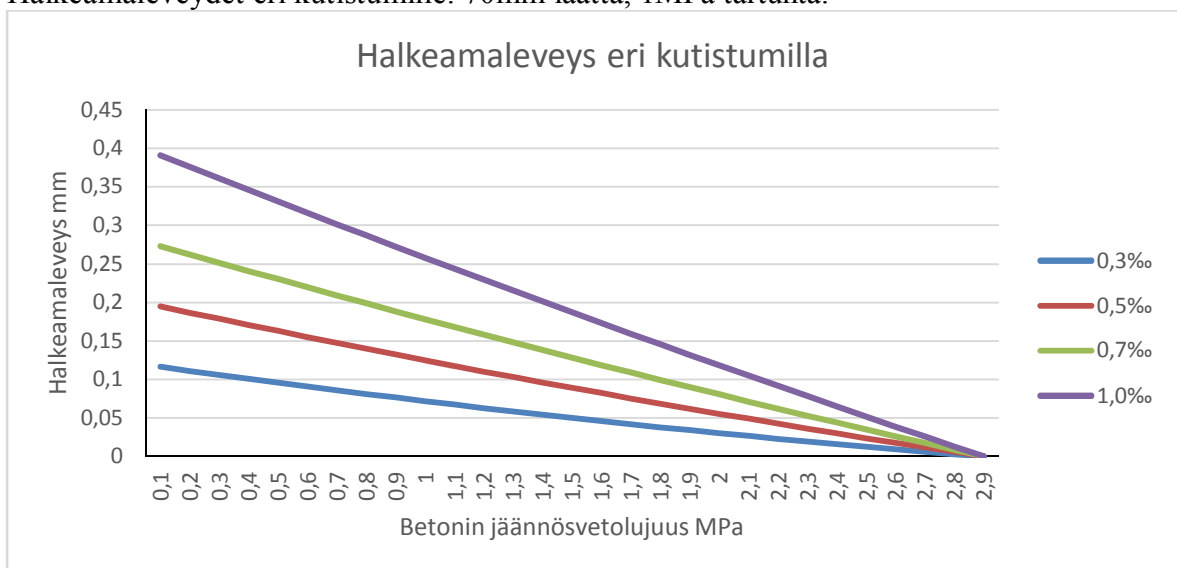
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 50mm laatta, 1MPa tartunta.



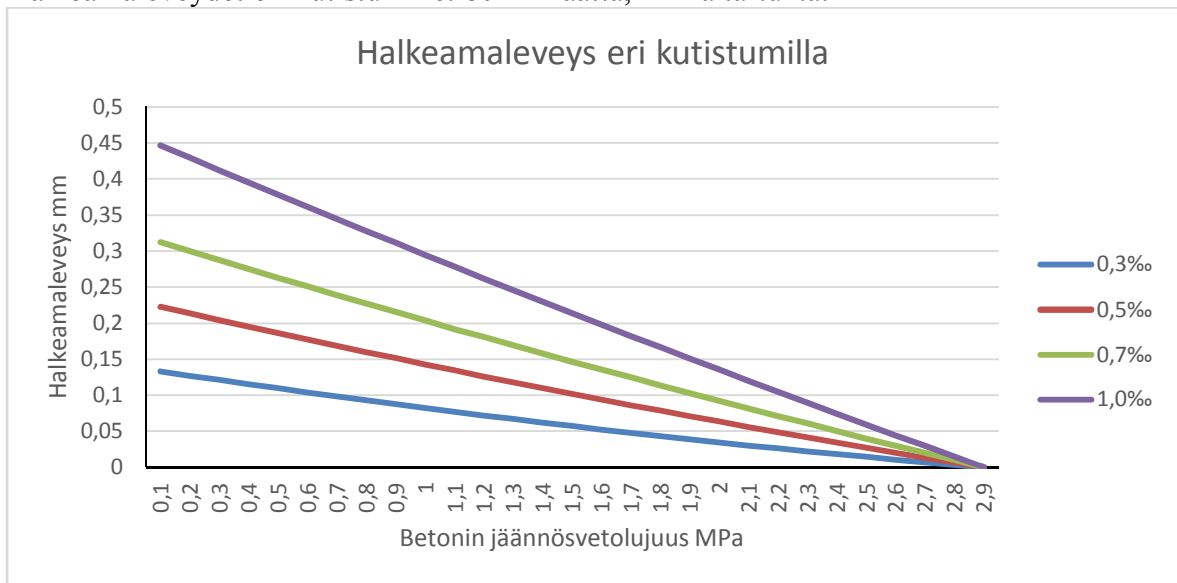
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 60mm laatta, 1MPa tartunta.



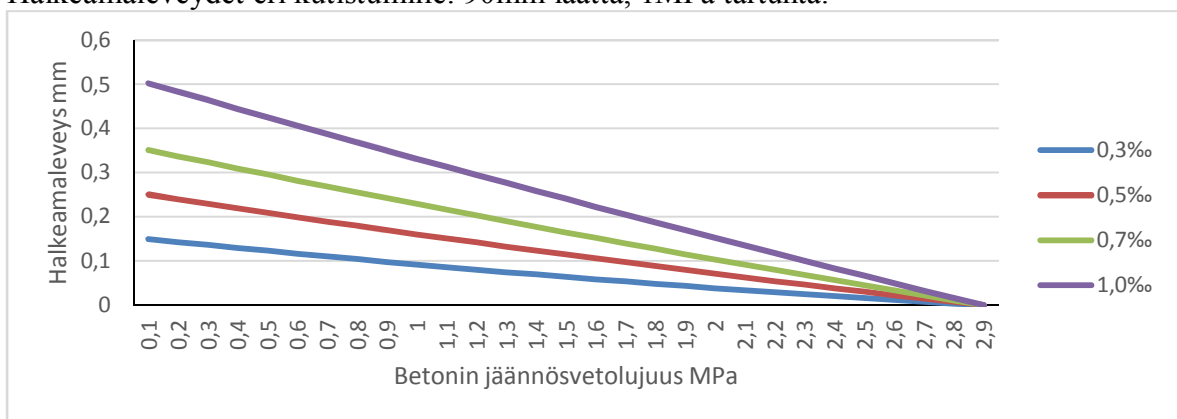
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 70mm laatta, 1MPa tartunta.



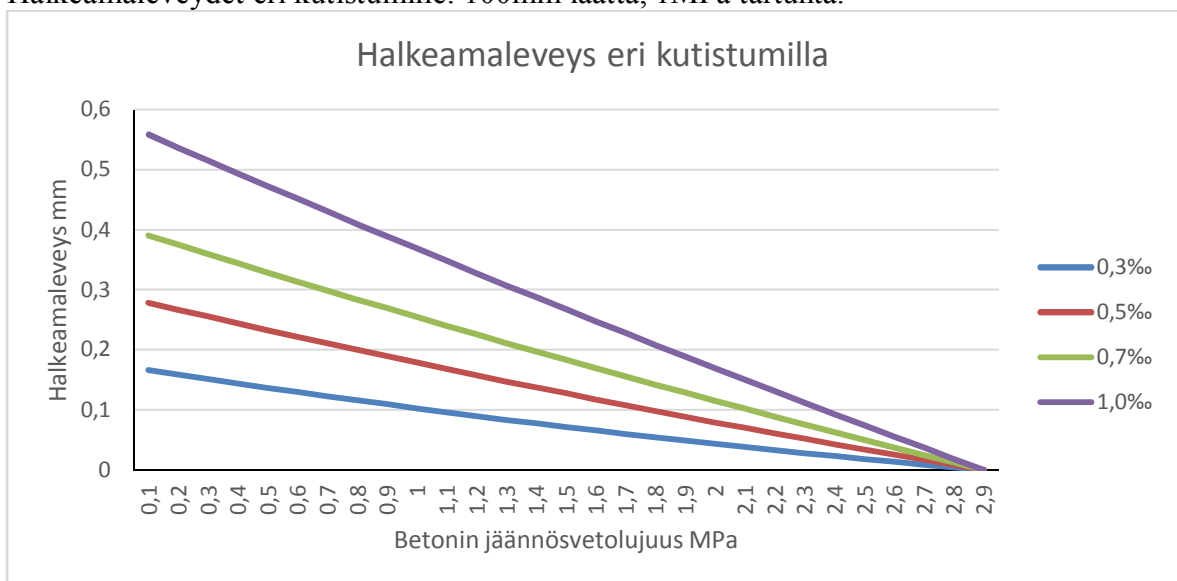
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 80mm laatta, 1MPa tartunta.



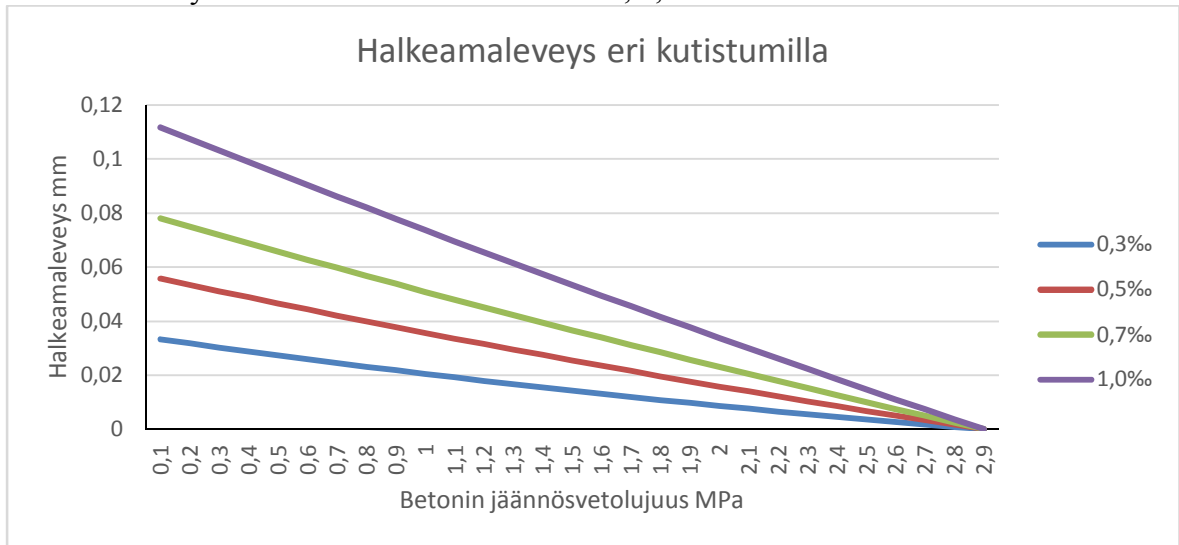
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 90mm laatta, 1MPa tartunta.



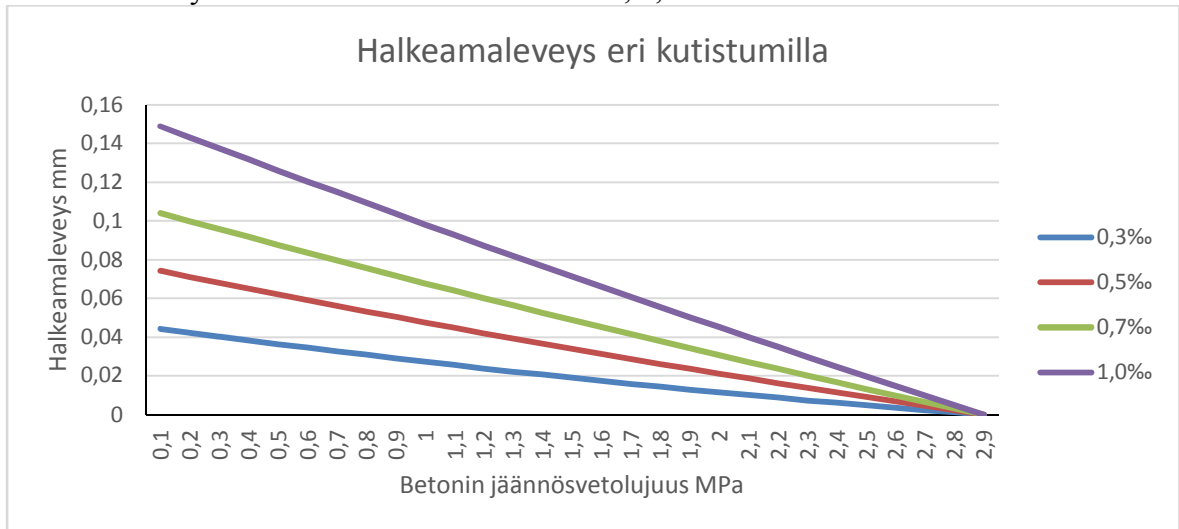
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 100mm laatta, 1MPa tartunta.



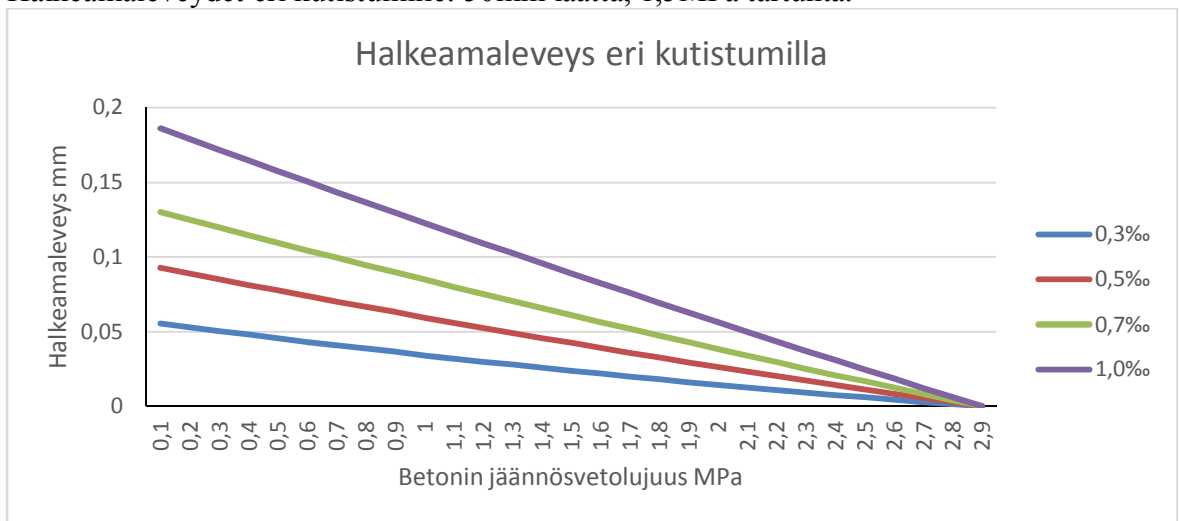
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 30mm laatta, 1,5MPa tartunta.



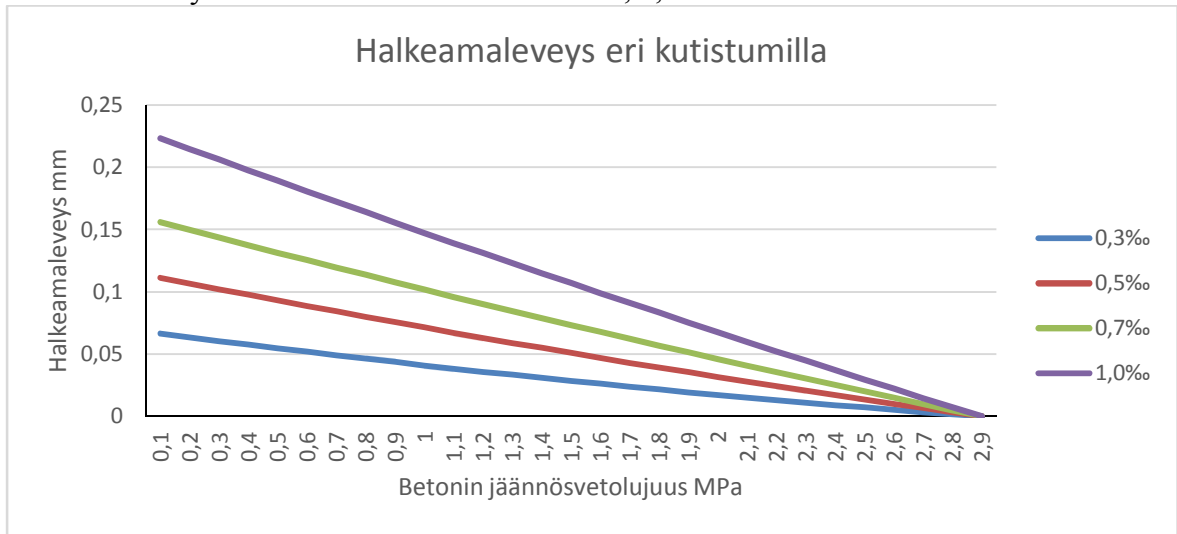
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 40mm laatta, 1,5MPa tartunta.



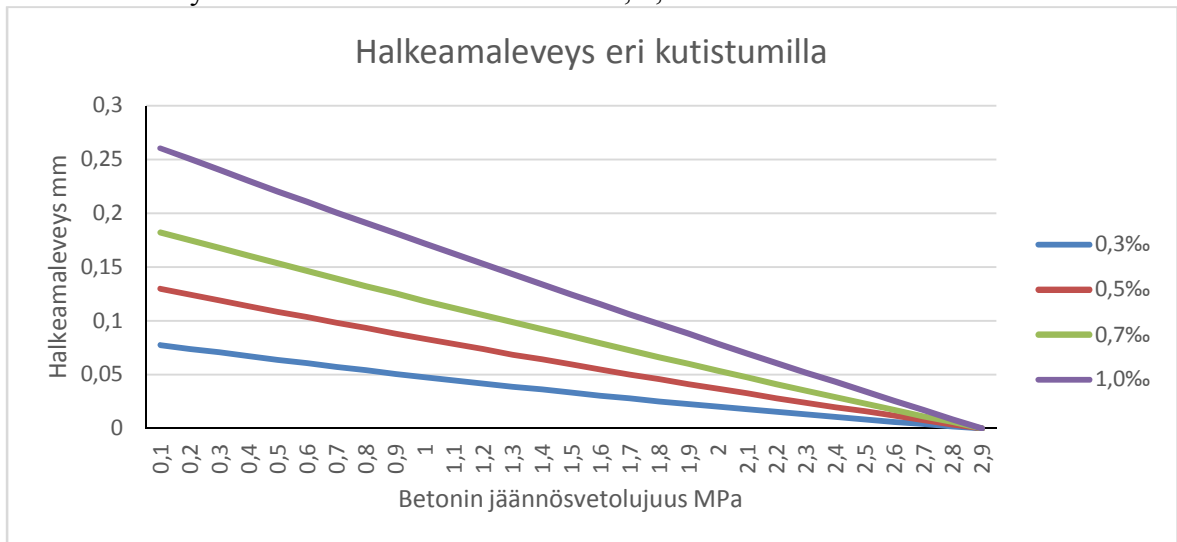
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 50mm laatta, 1,5MPa tartunta.



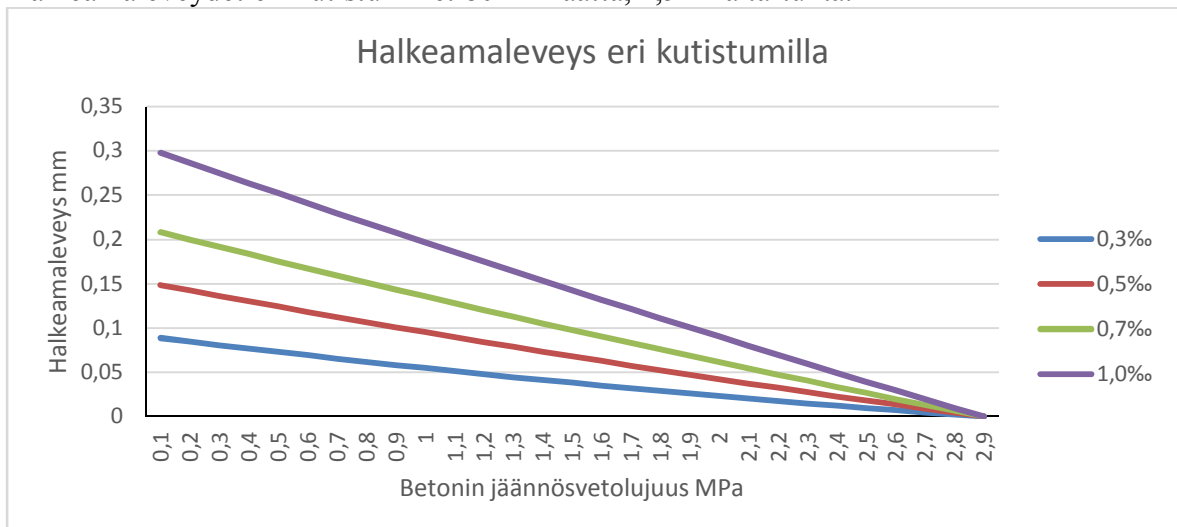
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 60mm laatta, 1,5MPa tartunta.



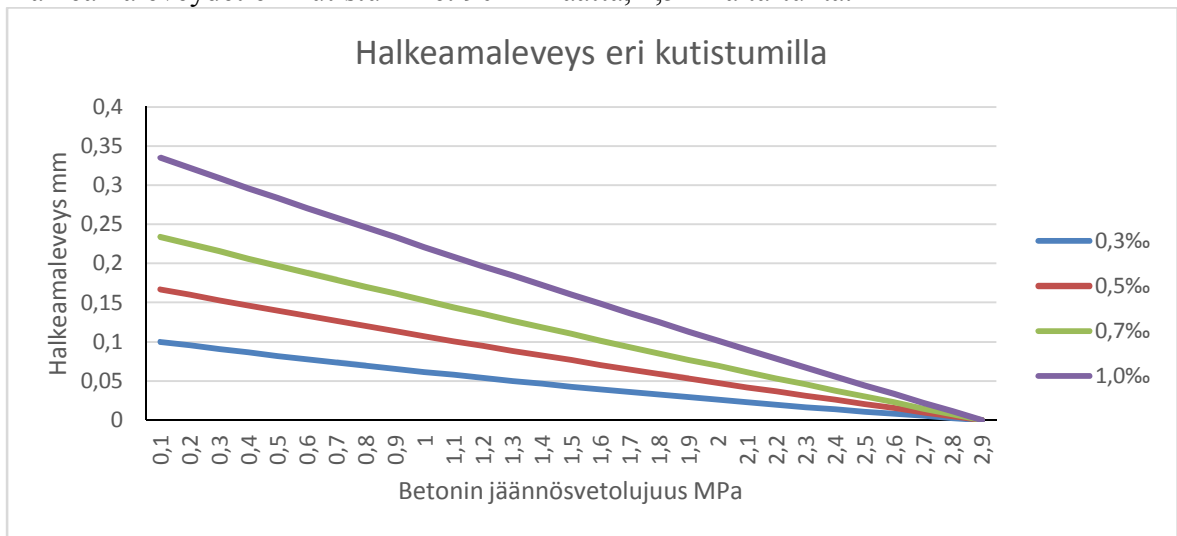
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 70mm laatta, 1,5MPa tartunta.



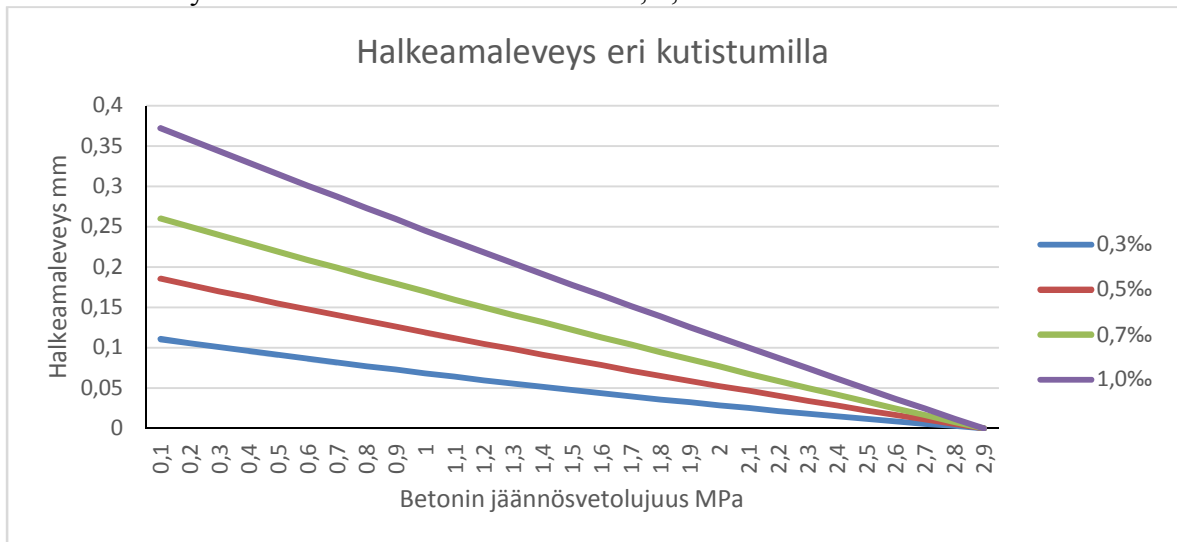
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 80mm laatta, 1,5MPa tartunta.



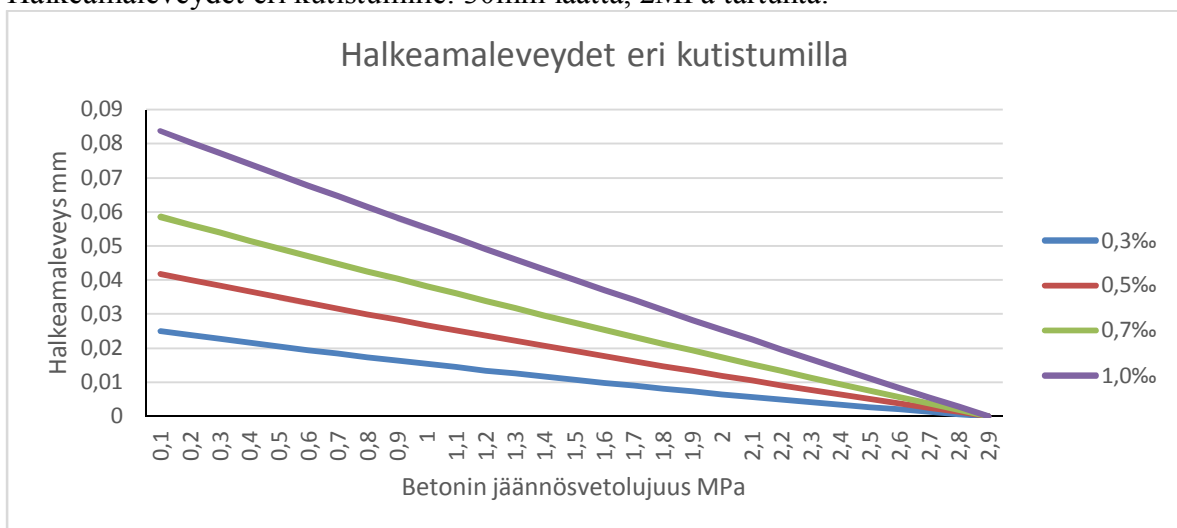
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 90mm laatta, 1,5MPa tartunta.



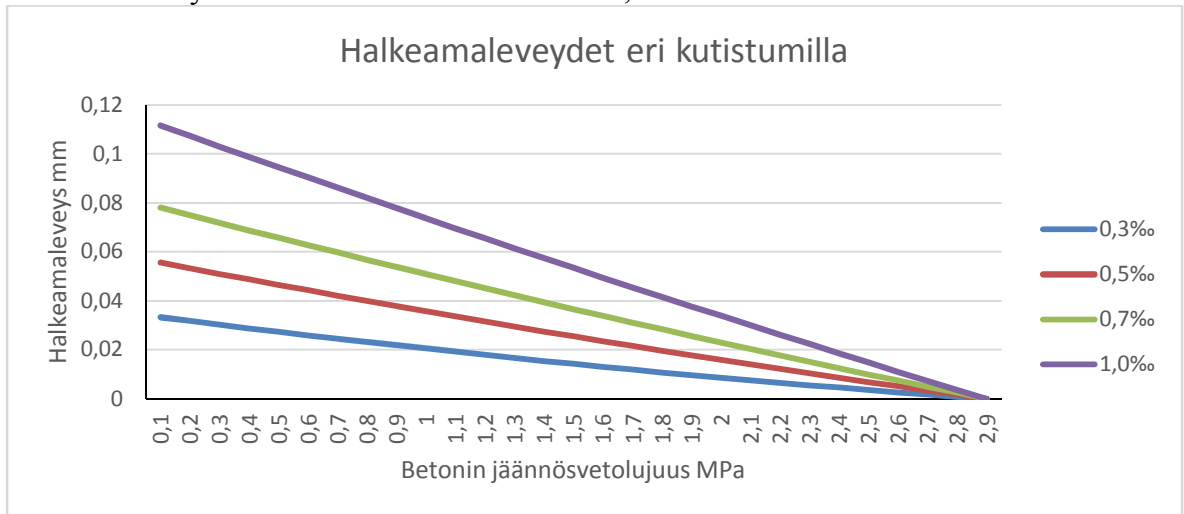
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 100mm laatta, 1,5MPa tartunta.



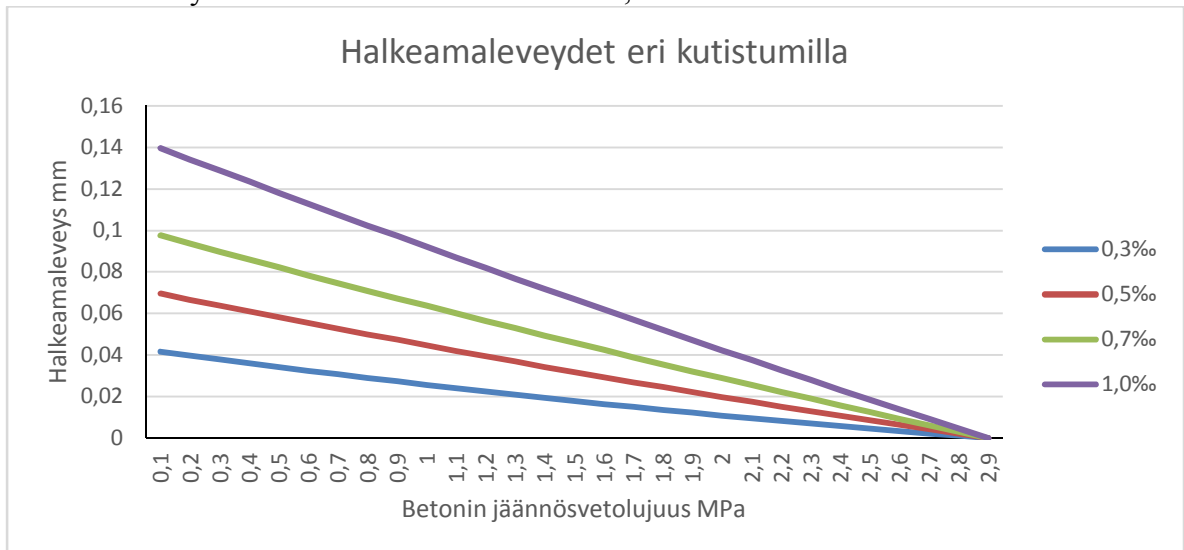
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 30mm laatta, 2MPa tartunta.



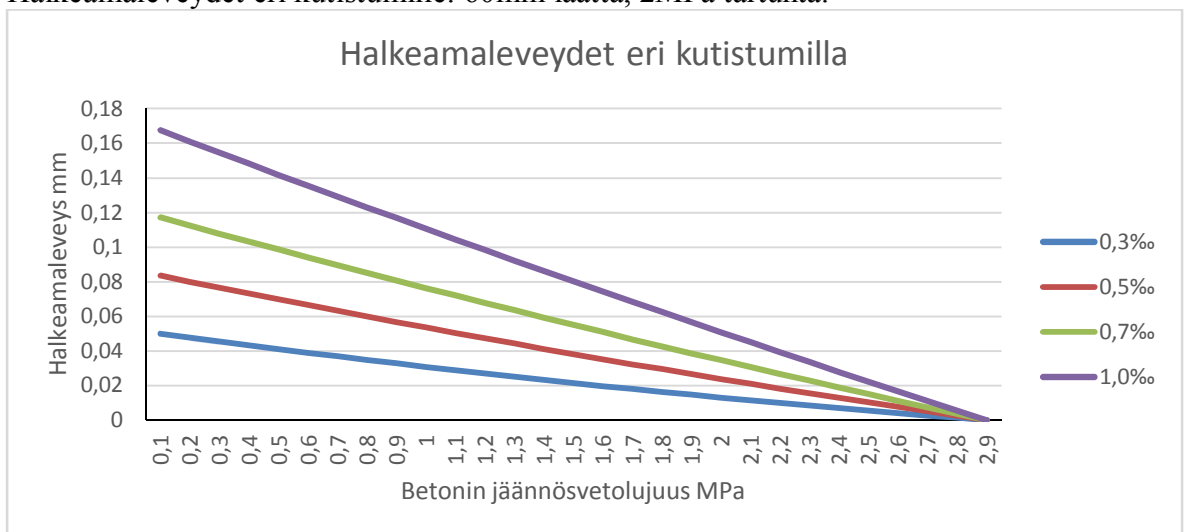
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 40mm laatta, 2MPa tartunta.



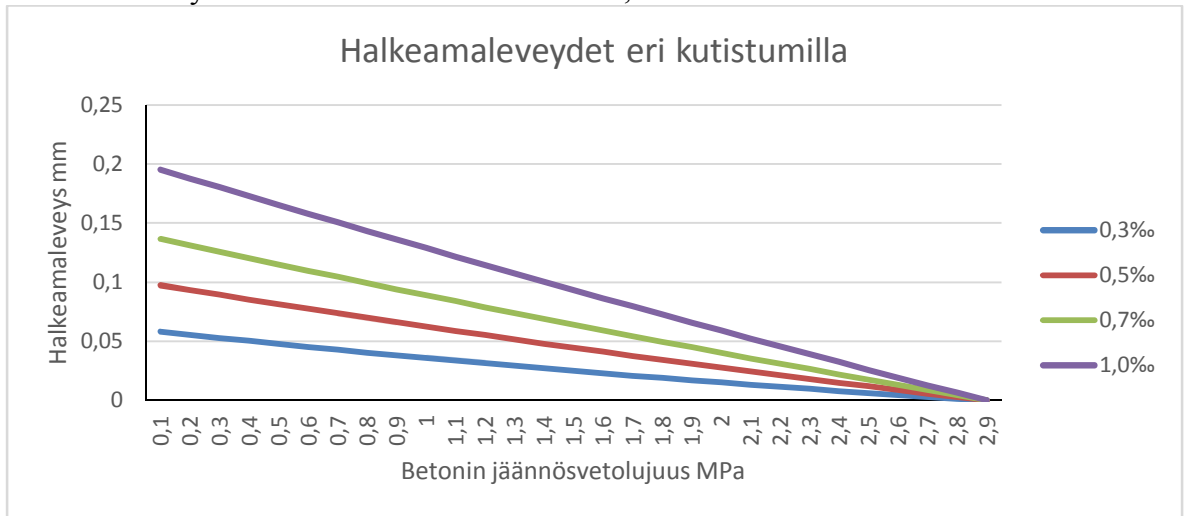
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 50mm laatta, 2MPa tartunta.



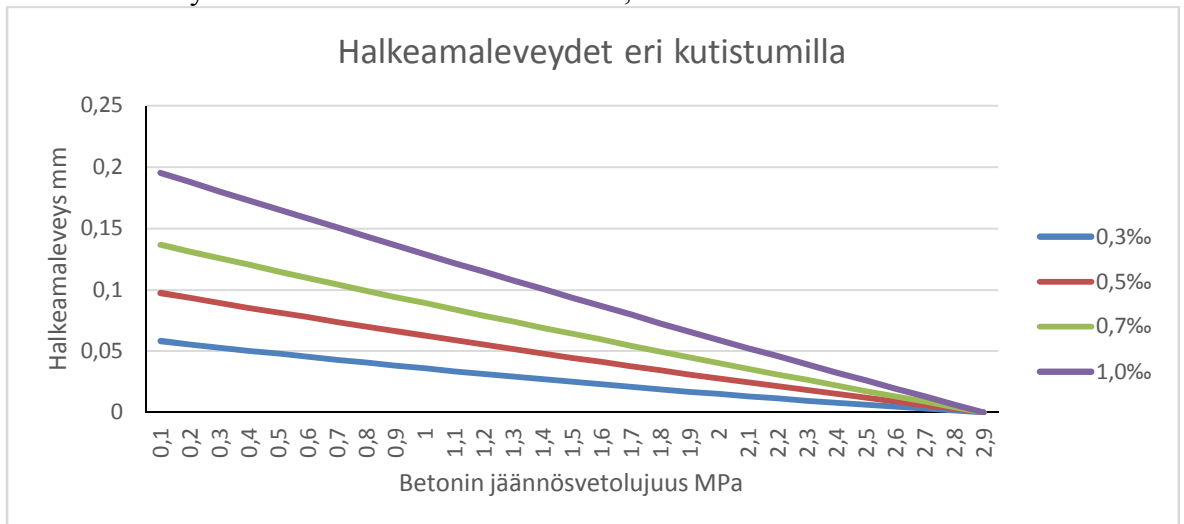
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 60mm laatta, 2MPa tartunta.



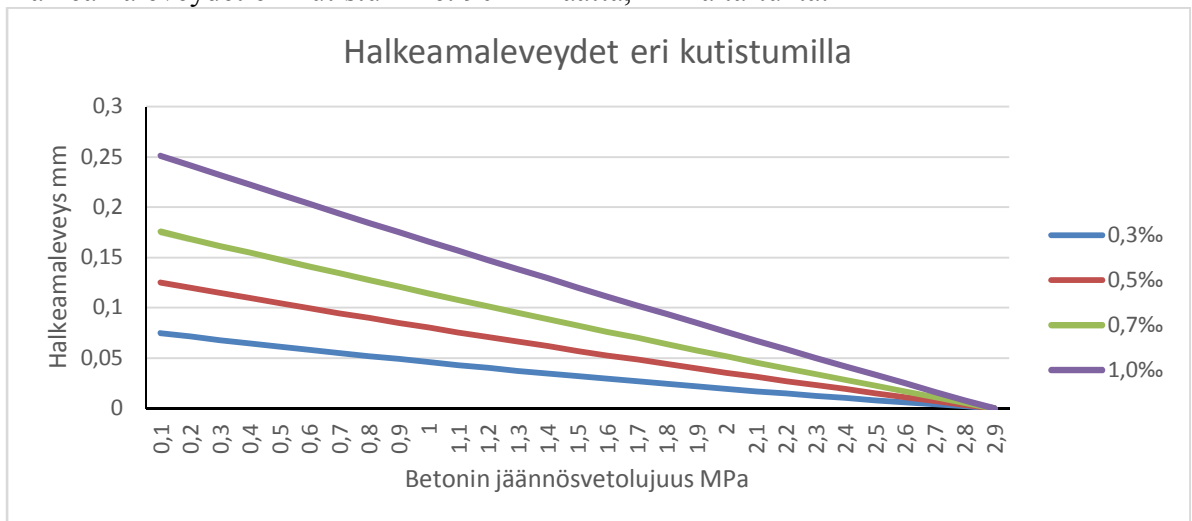
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 70mm laatta, 2MPa tartunta.



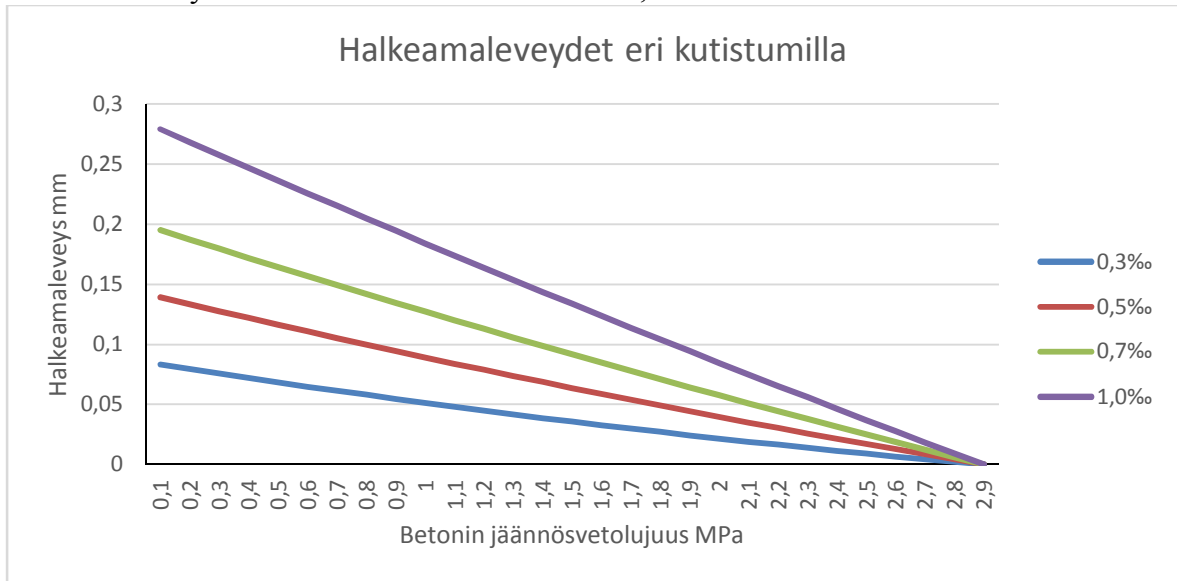
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 80mm laatta, 2MPa tartunta.



Halkeamaleveydet eri kutistumille: 90mm laatta, 2MPa tartunta.

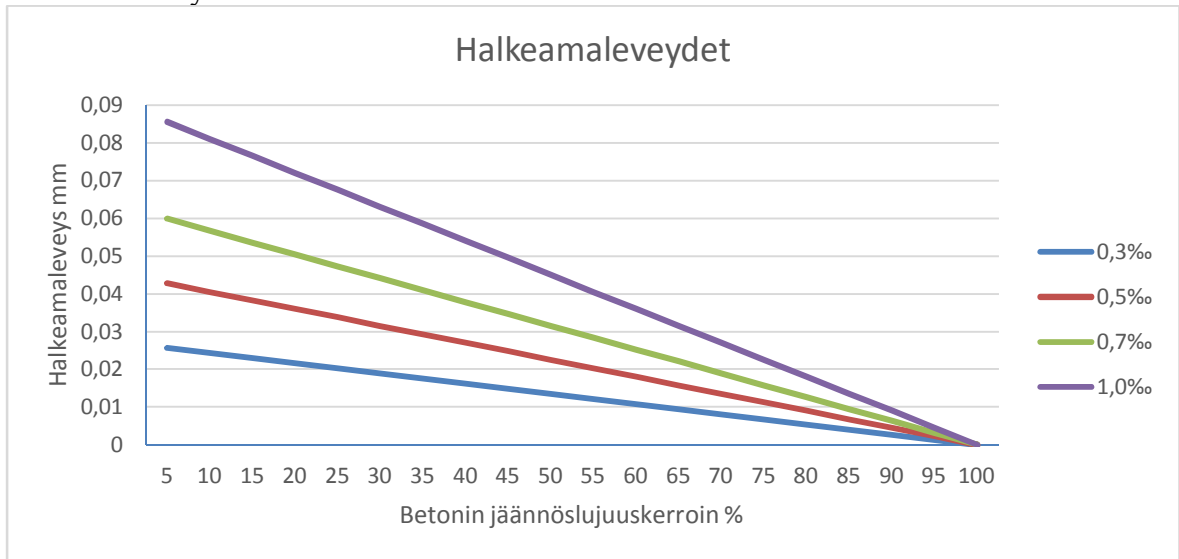


Halkeamaleveydet eri kutistumille: 100mm laatta, 2MPa tartunta.

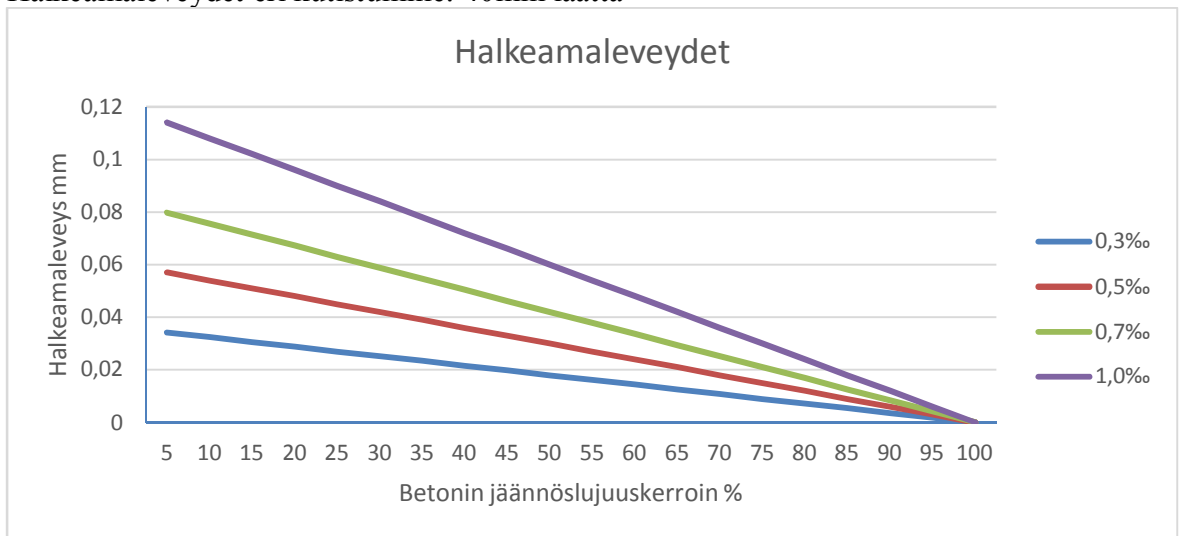


Liite 2. Halkeamaleveydet Industrigolv Betongrapport nr13, 2008 laskukaavalla

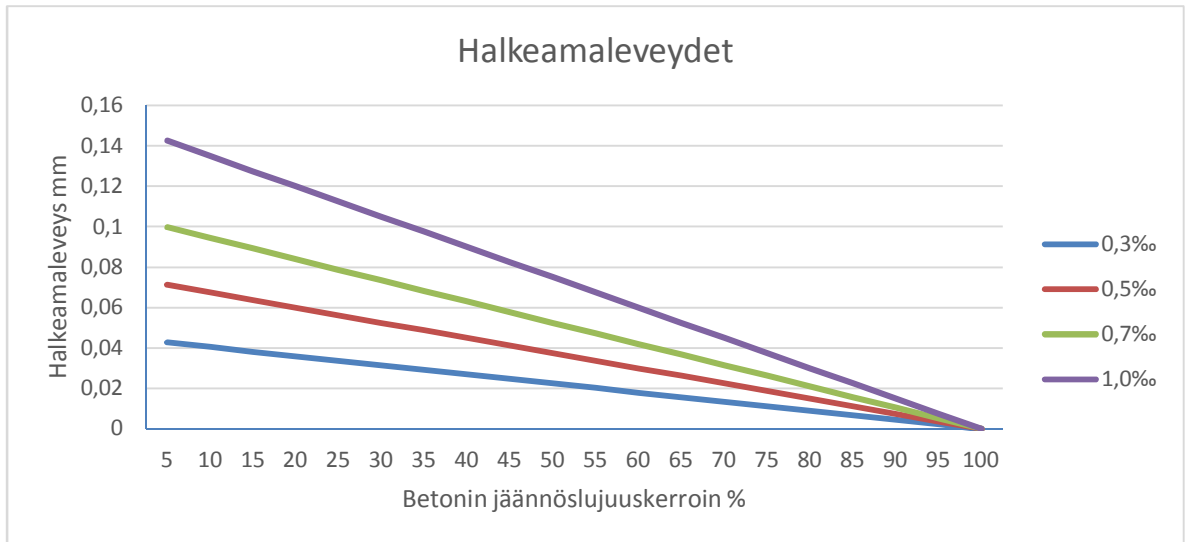
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 30mm laatta



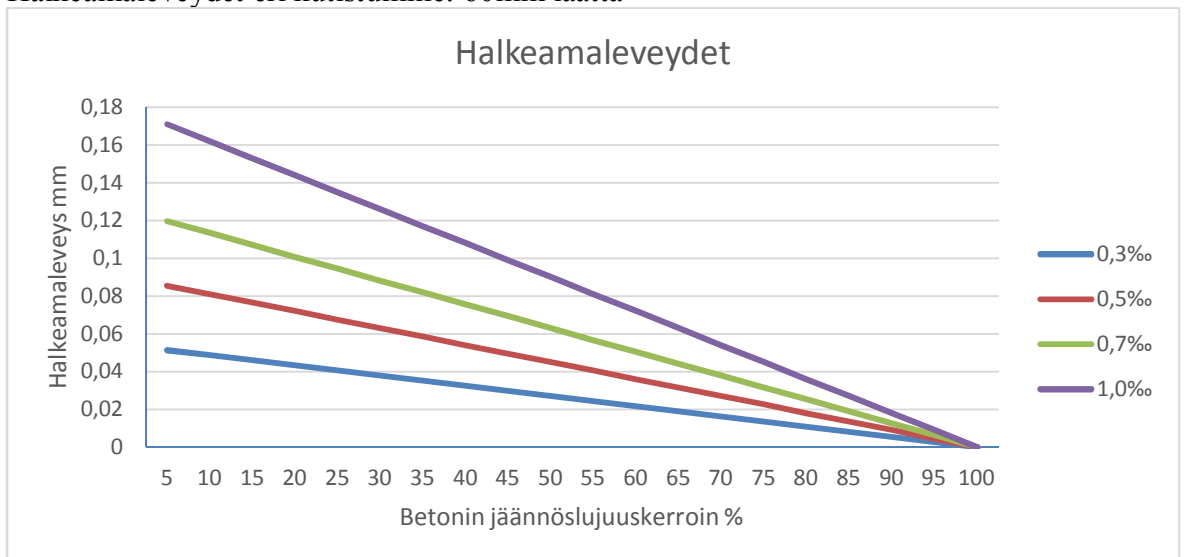
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 40mm laatta



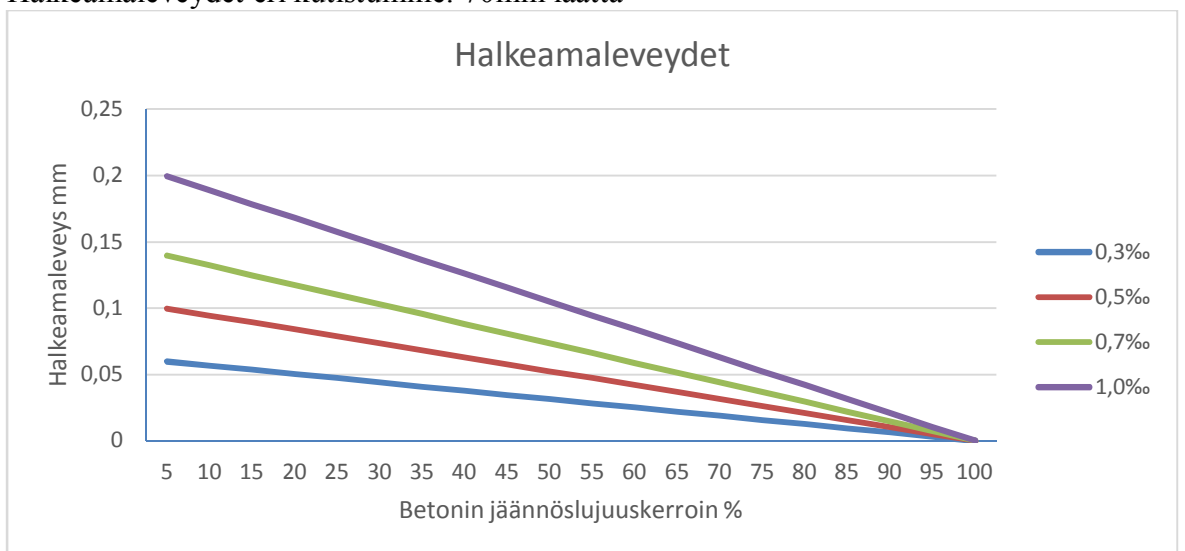
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 50mm laatta



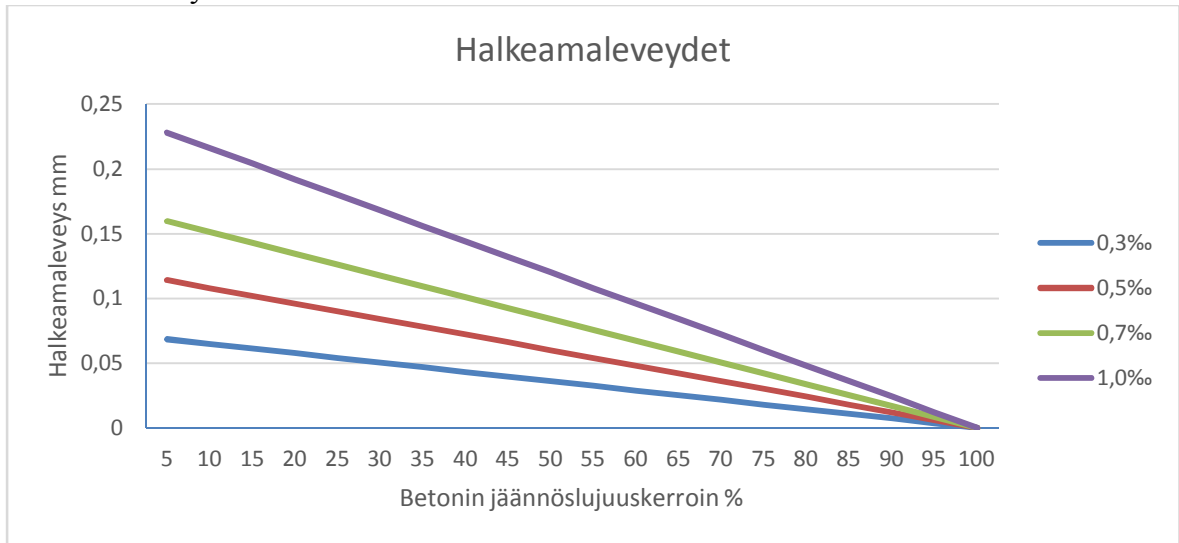
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 60mm laatta



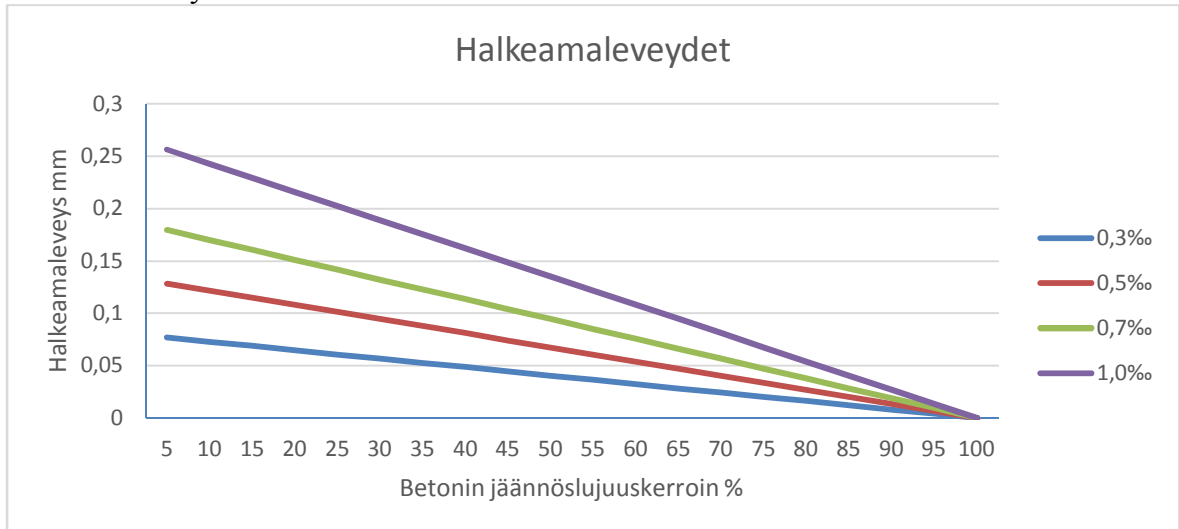
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 70mm laatta



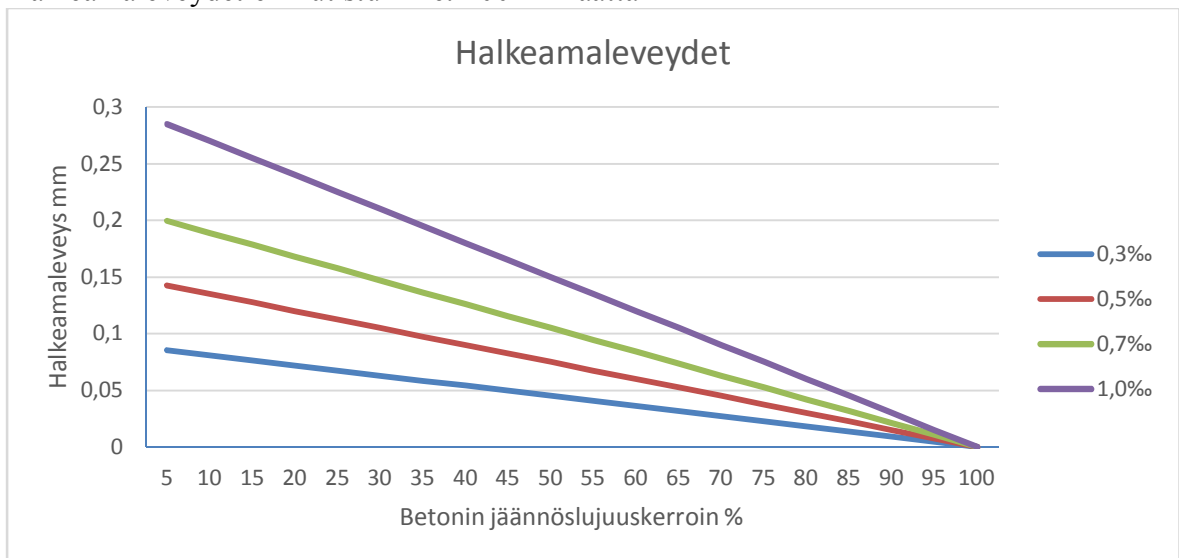
Halkeamaleveydet eri kutistumille: 80mm laatta



Halkeamaleveydet eri kutistumille: 90mm laatta

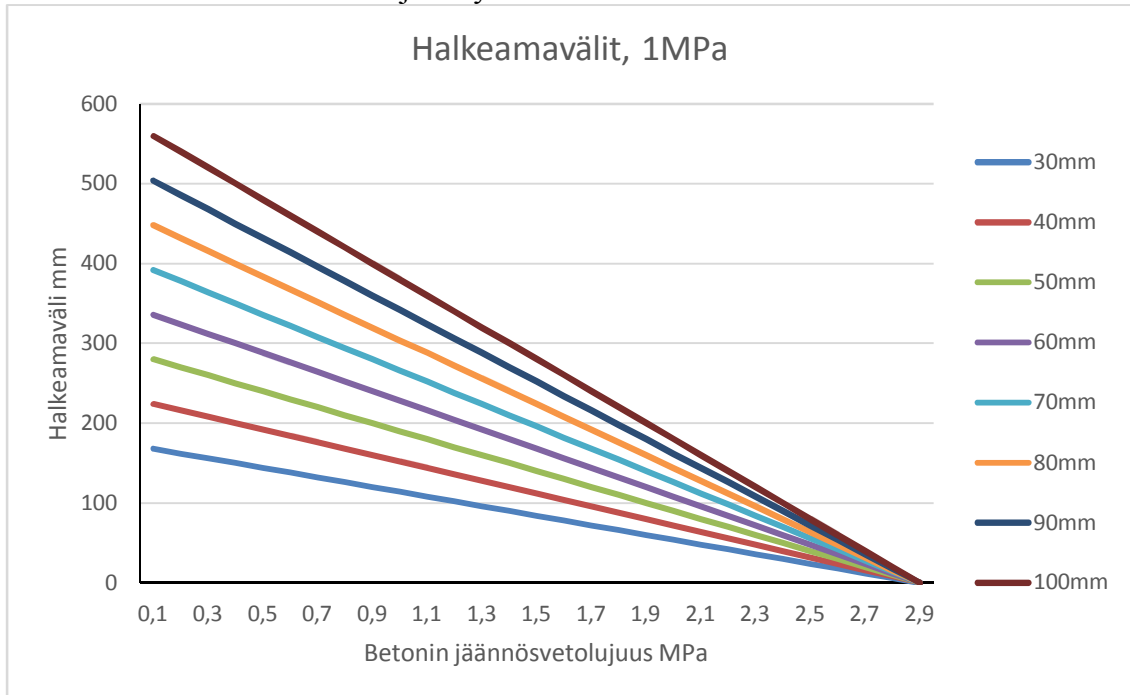


Halkeamaleveydet eri kutistumille: 100mm laatta

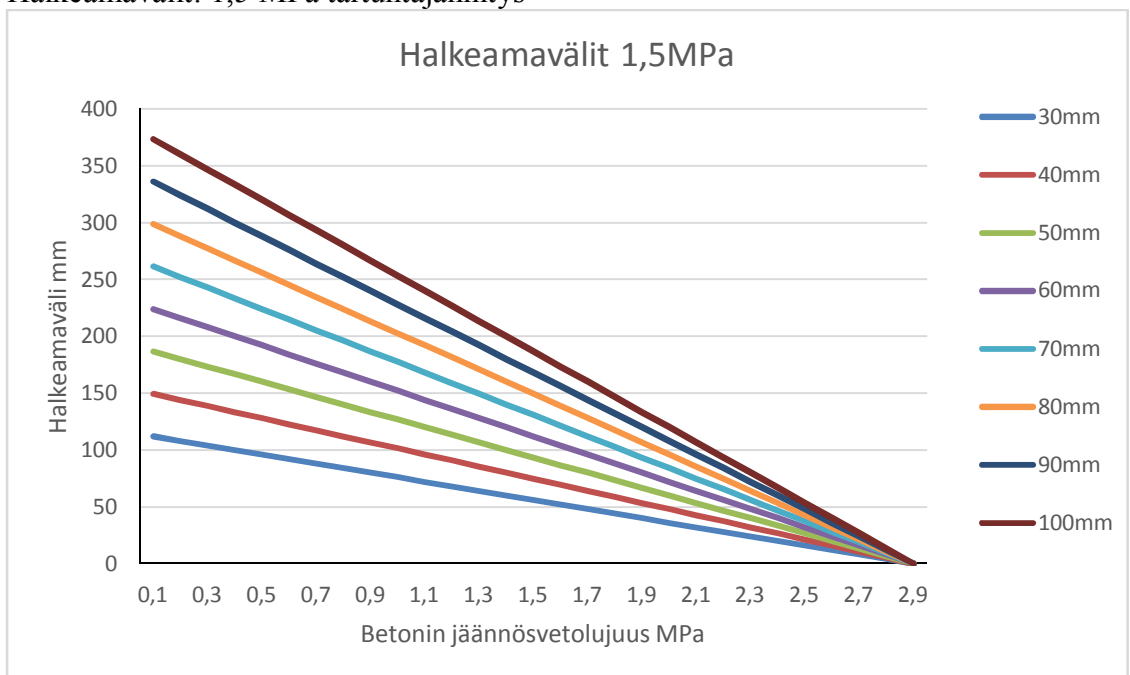


Liite 3. Halkeamavälit Mandl:n kaavalla

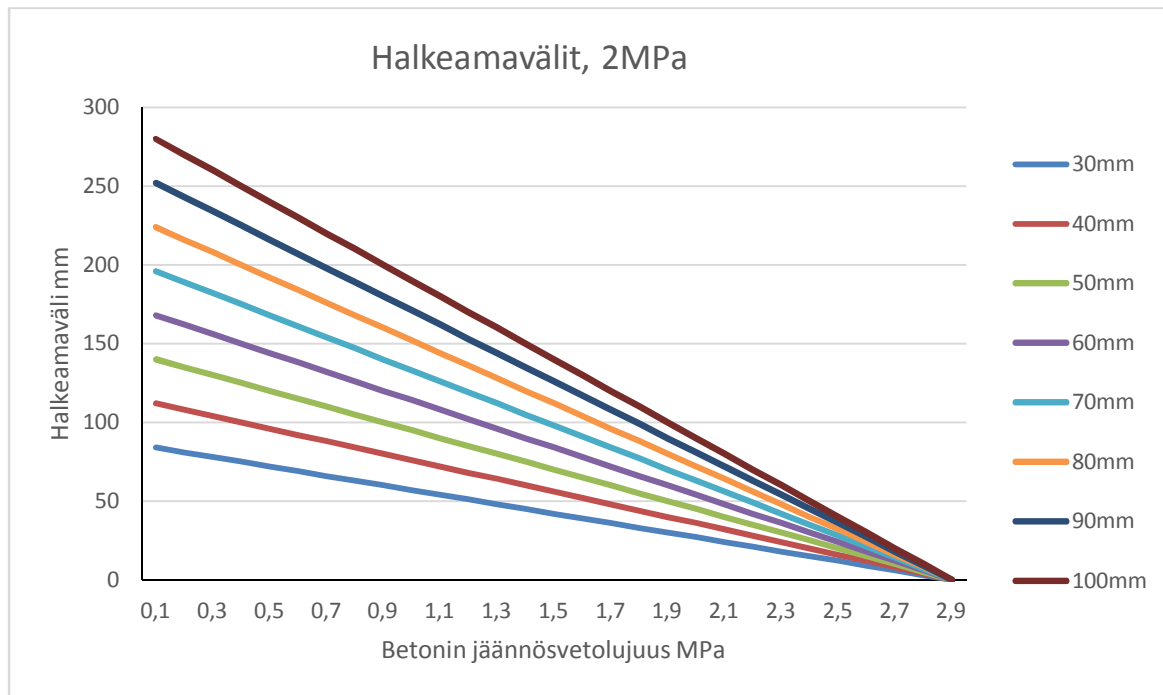
Halkeamavälit: 1 MPa tartuntajännitys



Halkeamavälit: 1,5 MPa tartuntajännitys

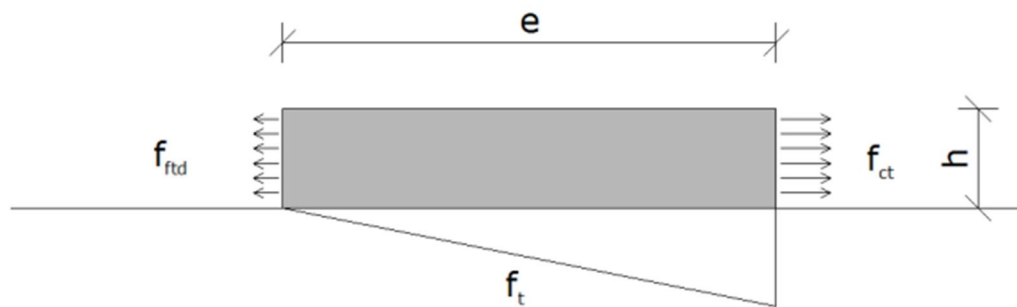


Halkeamavälit: 2 MPa tartuntajännitys



Liite 4. Oman laskukaavan johtaminen

Valitaan lähtökohdaksi yksinkertaistettu tilanne jossa halkeamia syntyy yhteen suuntaan. Laaditaan vapaakappalekuvio. Olettamana vasemmassa reunassa jo syntynyt halkeama, oikeassa reunassa seuraavan halkeaman sijainti. Vasemmassa reunassa vaikuttavana voimasuureena on kuitubetonin jäännösvetolujuus. Pintalattian ja alustan välisen leikkausjännityksen ajatellaan kasvavan kohti seuraavaa halkeamaa lineaarisesti. Vapaakappalekuvaajan oikeassa reunassa on voimasuureena betonin vetolujuus.



Vapaakappalekuvassa olevat termit:

f_{ftd}	on kuitubetonin jäännösvetolujuus
f_{ct}	on betonin vetolujuus
f_t	on tartuntajännitys
h	on laatan paksuus
e	on halkeamaväli
b	on betonikappaleen leveys (ei kuvassa)

Vapaakappalekuvaajan perusteella voimatasapaino:

$$f_{\text{ftd}} \cdot h \cdot b + f_t \cdot b \cdot e = f_{\text{ct}} \cdot h \cdot b$$

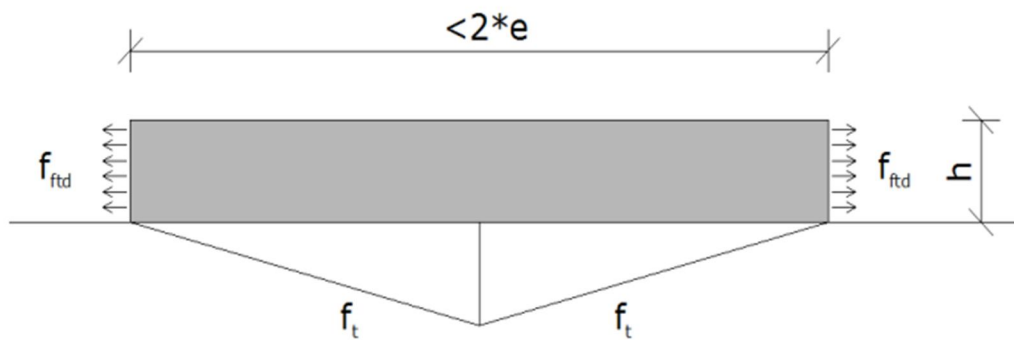
Tästä saadaan:

$$f_t \cdot e = f_{\text{ct}} \cdot h - f_{\text{ftd}} \cdot h$$

$$f_t \cdot e = (f_{\text{ct}} - f_{\text{ftd}}) \cdot h$$

$$e = \frac{(f_{\text{ct}} - f_{\text{ftd}}) h}{f_t}$$

Mikäli betoniin kuitenkin syntyy toisistaan riippumattomia halkeamia 2 kappaletta, voidaan vapaakappalekuvio "peilata", tällin kummastakin halkeamasta katsottuna tilanne on identtinen. Mikäli halkeaman pituus on pienempi kuin $2 \cdot e$ ei betonin vetolujuutta ylitetä halkeamien välissä.



Tällöin halkeamaleveydeksi voidaan yllä johdetun perusteella:

$$f_{\text{ftd}} \cdot h \cdot b + f_t \cdot b \cdot \frac{e}{2} = f_{\text{ct}} \cdot h \cdot b$$

Betonin vetojännitys kappaleen "puolivälissä"

Tästä saadaan:

$$f_t \cdot \frac{e}{2} = f_{\text{ct}} \cdot h - f_{\text{ftd}} \cdot h$$

$$f_t \cdot e = 2(f_{\text{ct}} - f_{\text{ftd}}) \cdot h$$

$$e = 2 \frac{(f_{\text{ct}} - f_{\text{ftd}}) h}{f_t}$$